

CIHEAM

MEMOIRE / DISSERTATION

requisse pour l'obtention du diplôme de  
*submitted for the Degree of*

**MASTER**

Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier

Proposition d'un indicateur pour évaluer  
la pression azotée d'origine agricole  
impactant la qualité des eaux de surface  
à l'échelle de la masse d'eau,  
adapté au contexte spécifique réunionnais

**Anais Chopard-Lallier**

Série « Master » n. 155

**2017**



## **Le Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes**

Créé en 1962 sous l'égide du Conseil de l'Europe et de l'OCDE, le CIHEAM est une organisation inter-gouvernementale qui réunit aujourd'hui treize Etats membres du bassin méditerranéen : Albanie, Algérie, Egypte, Espagne, France, Grèce, Italie, Liban, Malte, Maroc, Portugal, Tunisie, Turquie.

Le CIHEAM se structure autour de quatre instituts agronomiques méditerranéens (IAM), localisés à Bari (Italie), à Chania (Grèce), à Montpellier (France) et à Saragosse (Espagne), et d'un secrétariat général situé à Paris (France). Les instituts dispensent des enseignements post-universitaires de niveau Master of Science.

Le CIHEAM anime des réseaux de recherche en Méditerranée, favorise l'organisation d'enseignements spécialisés dans les pays membres, tient des séminaires et colloques rassemblant des techniciens et scientifiques spécialistes des questions agricoles de la région.

Au travers de ses activités, le Centre favorise le dialogue Nord/Sud et la coopération internationale pour le développement de l'agriculture dans la région méditerranéenne.

## ***The International Centre for Advanced Mediterranean Agronomic Studies***

*Founded in 1962 under the auspices of the Council of Europe and the OECD, the CIHEAM is an intergovernmental organization composed of thirteen member states: Albania, Algeria, Egypt, France, Greece, Italy, Lebanon, Malta, Morocco, Portugal, Spain, Tunisia, Turkey.*

*The CIHEAM is made up of four Mediterranean Agronomic Institutes (MAI) located in Bari (Italy), Chania (Greece), Montpellier (France) and Zaragoza (Spain), and a General Secretariat in Paris (France). The institutes provide post-graduate education at the Master of Science level.*

*The CIHEAM animates Mediterranean research networks, promotes the organization of specialized education cycles in member countries, holds seminars and workshops bringing together technicians and scientists specialized in Mediterranean agriculture.*

*Through these activities, the CIHEAM promotes North/South dialogue and international cooperation for agricultural development in the Mediterranean region.*

**Proposition d'un indicateur pour évaluer  
la pression azotée d'origine agricole  
impactant la qualité des eaux de surface  
à l'échelle de la masse d'eau,  
adapté au contexte spécifique réunionnais**

**Anais Chopard-Lallier**

**Série « Master » n. 155**

**2017**

## Série « Master »

Ce Master est le numéro 155 de la série *Master* de l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier.

Cette collection réunit les Masters du CIHEAM-IAMM ayant obtenu la mention « Publication ».

Le *Master* du Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes :  
**Proposition d'un indicateur pour évaluer la pression azotée d'origine agricole impactant la qualité des eaux de surface à l'échelle de la masse d'eau, adapté au contexte spécifique réunionnais.**

a été soutenu par **Anaïs Chopard-Lallier** le 21 septembre 2016 devant le jury suivant :

|                                          |        |
|------------------------------------------|--------|
| M. Hatem Belhouchette, CIHEAM-IAMM.....  | Membre |
| M. Philippe Le Grusse, CIHEAM-IAMM.....  | Membre |
| Mme Magalie Lesueur Jannoyer, CIRAD..... | Membre |
| M. Philippe Cattan, CIRAD.....           | Membre |

Le travail de recherche a été encadré par **M. Hatem Belhouchette**

L'Institut Agronomique Méditerranéen n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions n'engagent que leur auteur.

### CIHEAM-IAMM

Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier

**Directeur : Pascal Bergeret**

3191 Route de Mende - 34093 Montpellier cedex 05  
Tél. : (33) (0)4 67 04 60 00 – Fax : (33) (0)4 67 54 25 27  
<http://www.iamm.ciheam.org>



**Pour citer cet ouvrage :**

Chopard-Lallier A. (2017). *Proposition d'un indicateur pour évaluer la pression azotée d'origine agricole impactant la qualité des eaux de surface à l'échelle de la masse d'eau, adapté au contexte spécifique réunionnais*. Montpellier (France) : CIHEAM-IAMM. 91 p. (Master, n. 155).

ISBN: 978-2-85352-572-5 ; ISSN : 0989-473X

**Résumé**

La Directive Cadre sur l'eau est une directive européenne visant à l'atteinte du bon état de l'ensemble des masses d'eau européennes. Elle exige qu'un état des lieux de ces masses d'eau soit réalisé tous les 6 ans. Celui-ci se compose d'un volet évaluation des pressions agricoles et, notamment, de la pression azotée. Des méthodes d'évaluation pour mesurer cette pression ont été développées en France métropolitaine ; malheureusement, celles-ci ne prennent pas en compte les conditions spécifiques des Départements d'Outre-Mer. C'est en ce sens que notre travail tente de construire un indicateur de la pression azotée d'origine agricole impactant la qualité des eaux de surface, à l'échelle de la masse d'eau, dans le contexte réunionnais et plus largement dans celui des DOM. La démarche mise en place se veut participative : à partir de rencontres avec les acteurs locaux, nous avons élaboré une représentation partagée du processus de pollution azotée. Un modèle conceptuel d'indicateur a été construit et testé selon deux hypothèses concernant les pratiques de fertilisation. La première hypothèse a été formulée selon les dires d'acteurs, la deuxième de façon théorique. Les résultats de ces tests diffèrent en fonction de l'hypothèse utilisée à l'échelle de la parcelle, mais semblent converger après agrégation à l'échelle de la masse d'eau. Aucune des deux hypothèses ne paraissant cependant concorder avec la réalité, l'indicateur devra être simplifié à moins que des enquêtes complémentaires sur les pratiques réelles de fertilisation soient réalisées pour pallier au manque de données à ce sujet. Après quoi, cet outil pourra être utilisé lors du prochain état des lieux à La Réunion et, sous quelques conditions, aux Antilles et à Mayotte.

**Mots clés auteur**

Indicateur environnemental, azote, nitrate, eau de surface, approche participative, La Réunion.

**Title : *Proposition of an indicator to evaluate the agricultural nitrogen pressure impacting surface water quality on the scale of a body of water, adapted to the specific context of Réunion***

**Abstract**

*The Water Framework Directive is an EU directive aimed at achieving a good status for all European bodies of water. It stipulates that an inventory of these water bodies must be conducted every 6 years. This involves an evaluation of agricultural pressures, and in particular nitrogen pressure. Assessment methods to measure this pressure have been developed in mainland France; unfortunately, they do not take the specific conditions of the French overseas departments into account. That is why our work endeavors to construct an indicator of agricultural nitrogen pressure impacting surface water quality on the scale of a body of water in the context of Réunion Island and, more broadly speaking, in overseas departments. The approach implemented is participatory: from meetings with local stakeholders, we developed a shared representation of the local nitrogen pollution process. A conceptual model was built and tested according to two hypotheses relating to the fertilization practices. The first was formulated based on stakeholders' accounts while the second was theoretical. The results of these tests differ according to the hypothesis used on the plot scale, but seem to converge after aggregation on the scale of the body of water. Neither hypothesis seems to be consistent with reality, and the indicator should be simplified unless further investigations are conducted on actual fertilization practices to overcome the lack of data on this subject. This tool could subsequently be used during the next inventory on Réunion Island and, conditionally, in the Caribbean and Mayotte.*

**Author keywords**

*Environmental indicator, nitrogen, nitrates, surface water, participatory approach, Reunion.*



# Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail et, plus globalement, à mes cinq années de formation.

Je remercie tout d'abord mes encadrants de stage au Cirad : Fabrice Le Bellec, Philippe Cattan et Magalie Jannoyer pour m'avoir accordé leur confiance, pour leurs précieux conseils et pour le temps qu'ils m'ont dédié tout au long de ces 6 mois de stage.

Je remercie mon tuteur à l'IAM, Hatem Belhouchette, pour son très bon suivi et ses conseils.

Je tiens aussi à remercier tous mes collègues du Cirad : Magali Lambert avec qui j'ai eu grand plaisir à travailler à distance et toute l'équipe de la station Bassin plat pour m'avoir accueillie.

Merci aux autres stagiaires, Guillaume, Maeliss, Agathe et Aude pour leur bonne humeur quotidienne et, tout particulièrement, à mes colocataires, Nina et Marine, avec qui j'ai partagé de nombreuses aventures et qui ont rendu mon séjour mémorable.

Merci aux copains, Mathieu, Cassou, Jess et J, qui sont venus me rendre visite sur l'île et qui ont rendu ce périple encore plus agréable.

Enfin, un très grand merci à mes parents qui m'ont soutenu dans tout ce que j'ai entrepris tout au long de mes études.



# Sommaire

|                                                                                                                                                      |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Figures .....                                                                                                                                        | 3         |
| Tableaux.....                                                                                                                                        | 4         |
| Introduction générale .....                                                                                                                          | 5         |
| <b>Partie 1 - Revue bibliographique .....</b>                                                                                                        | <b>7</b>  |
| <b>I - Le contexte réglementaire .....</b>                                                                                                           | <b>9</b>  |
| 1. La Directive Cadre Européenne et les objectifs pour 2021 .....                                                                                    | 9         |
| 2. La directive nitrates.....                                                                                                                        | 10        |
| 3. L'état des lieux.....                                                                                                                             | 10        |
| 4. La gestion de l'eau : de la DCE au bassin versant .....                                                                                           | 10        |
| 5. Cas de La Réunion .....                                                                                                                           | 10        |
| <b>II - L'agriculture et la pression azotée à La Réunion.....</b>                                                                                    | <b>11</b> |
| 1. L'agriculture réunionnaise .....                                                                                                                  | 11        |
| 2. La pression azotée d'origine agricole.....                                                                                                        | 12        |
| <b>III - L'azote, de la pression à la pollution .....</b>                                                                                            | <b>13</b> |
| 1. Le cycle de l'azote .....                                                                                                                         | 13        |
| 2. Les processus hydrologiques.....                                                                                                                  | 14        |
| <b>IV - L'évaluation des pressions via des indicateurs .....</b>                                                                                     | <b>19</b> |
| 1. Notion d'indicateur .....                                                                                                                         | 19        |
| 2. Notion de pression .....                                                                                                                          | 20        |
| 3. Les indicateurs permettant d'évaluer la pression .....                                                                                            | 21        |
| 4. Les principaux indicateurs existants pour mesurer la pression azotée .....                                                                        | 22        |
| 5. Pourquoi les indicateurs de métropole ne sont pas adaptés.....                                                                                    | 24        |
| 6. Insuffisance des indicateurs de l'état des lieux 2013 .....                                                                                       | 24        |
| <b>V - Problématique, question de recherche et démarche générale .....</b>                                                                           | <b>25</b> |
| <b>Partie 2 - Matériel et méthode.....</b>                                                                                                           | <b>27</b> |
| <b>I - Identification des objectifs et attentes des acteurs.....</b>                                                                                 | <b>29</b> |
| 1. Identification des acteurs impliqués dans la démarche participative.....                                                                          | 29        |
| 2. Identification des objectifs et attentes .....                                                                                                    | 30        |
| <b>II - Représentation collective du processus de pollution azotée à La Réunion : description du phénomène et hiérarchisation des facteurs .....</b> | <b>31</b> |
| <b>III - Sélection de variables et collecte de données.....</b>                                                                                      | <b>31</b> |
| <b>IV - Construction du modèle conceptuel d'indicateur.....</b>                                                                                      | <b>32</b> |
| <b>Partie 3 - Résultats .....</b>                                                                                                                    | <b>33</b> |
| <b>I - Les objectifs environnementaux et les attentes des acteurs .....</b>                                                                          | <b>35</b> |
| 1. Les objectifs .....                                                                                                                               | 35        |
| 2. Les attentes des acteurs .....                                                                                                                    | 35        |
| <b>II - La représentation partagée du processus de pollution à La Réunion.....</b>                                                                   | <b>36</b> |
| 1. Les facteurs impactant le processus de pollution azotée en général.....                                                                           | 36        |
| 2. Cas de La Réunion .....                                                                                                                           | 38        |

|                                                                                                                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>III - Sélection de variables et de données .....</b>                                                                                                         | <b>38</b> |
| 1. Type d'engrais ou de matière organique .....                                                                                                                 | 38        |
| 2. Quantités d'engrais et de matière organique apportées et besoins de la culture.....                                                                          | 39        |
| 3. Fractionnement des apports.....                                                                                                                              | 40        |
| 4. Lane d'eau.....                                                                                                                                              | 40        |
| <b>IV - Construction du modèle conceptuel de l'indicateur .....</b>                                                                                             | <b>40</b> |
| 1. Analyse des méthodes existantes .....                                                                                                                        | 40        |
| 2. Construction d'un modèle conceptuel « sur mesure ».....                                                                                                      | 41        |
| 3. Estimation et spatialisation de la balance azotée à l'échelle de la parcelle .....                                                                           | 42        |
| 4. Estimation et spatialisation de la lame d'eau à l'échelle de la parcelle.....                                                                                | 50        |
| 5. Estimation et spatialisation de l'azote lixivié par hectare à l'échelle de la parcelle.....                                                                  | 50        |
| 6. Agrégation des résultats à l'échelle de la masse d'eau.....                                                                                                  | 57        |
| <b>V - Comparaison avec les zones à tendance à la hausse : y a-t-il concordance ? .....</b>                                                                     | <b>61</b> |
| <b>Partie 4 - Discussion.....</b>                                                                                                                               | <b>63</b> |
| <b>I - Les raisons potentielles des différences entre les résultats des estimations et les mesures des concentrations en nitrates dans les cours d'eau.....</b> | <b>65</b> |
| <b>II - Démarche participative et démarche théorique .....</b>                                                                                                  | <b>66</b> |
| <b>III - Qu'est-ce qu'apporte cet indicateur par rapport aux précédents ?.....</b>                                                                              | <b>66</b> |
| 1. Adéquation à l'objet.....                                                                                                                                    | 66        |
| 2. Homogénéité de la mesure .....                                                                                                                               | 67        |
| 3. Respect de l'inertie propre de l'objet .....                                                                                                                 | 67        |
| <b>IV - Les difficultés et les limites de nos travaux .....</b>                                                                                                 | <b>68</b> |
| 1. Une méthode partiellement participative .....                                                                                                                | 68        |
| 2. Une répartition théorique basée uniquement sur les besoins des cultures .....                                                                                | 68        |
| 3. Un manque de connaissances sur les pratiques de fertilisation réelles.....                                                                                   | 68        |
| <b>V - Perspectives : sous quelles conditions cette méthode est-elle applicable à La Réunion et aux autres DOM ? .....</b>                                      | <b>69</b> |
| Conclusion .....                                                                                                                                                | 70        |
| Bibliographie.....                                                                                                                                              | 71        |
| Webographie .....                                                                                                                                               | 74        |
| <b>Annexes .....</b>                                                                                                                                            | <b>75</b> |
| Annexe 1 - Tableau comparatif des méthodes d'évaluation existantes .....                                                                                        | 77        |
| Annexe 2 - Compte-rendu première réunion .....                                                                                                                  | 83        |
| Annexe 3 - Compte rendu de la deuxième réunion.....                                                                                                             | 84        |
| Annexe 4 - Synthèse des réponses au sondage .....                                                                                                               | 86        |
| Annexe 5 - Estimation des besoins par classe de culture.....                                                                                                    | 88        |
| Annexe 6 - Calcul des entrées d'azote par parcelle .....                                                                                                        | 89        |
| Annexe 7 - Calcul mm irrigués.....                                                                                                                              | 91        |

# Figures

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 - Le cycle de la DCE.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 9  |
| Figure 2 - Occupation du sol à La Réunion.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 11 |
| Figure 3 - Le cycle de l'azote.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 13 |
| Figure 4 - Schéma du transfert des eaux .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 15 |
| Figure 5 - Pluviométrie annuelle en mm, normales de 1981 à 2010 .....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 16 |
| Figure 6 - Carte du réseau hydrographique de l'île de La Réunion .....                                                                                                                                                                                                                                                                              | 17 |
| Figure 7 - Délimitation des grands bassins versants avec exutoire en mer .....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 17 |
| Figure 8 - Schéma conceptuel de l'hydrogéologie à La Réunion .....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 18 |
| Figure 9 - Carte du relief de La Réunion.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 19 |
| Figure 10 - Schéma du modèle DPSIR .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 20 |
| Figure 11 - Une représentation simplifiée de l'approche Pression-Etat-Réponse dans le cas des pollutions de l'eau provenant des activités agricoles.....                                                                                                                                                                                            | 21 |
| Figure 12 - Les acteurs impliqués dans le processus de développement des indicateurs.....                                                                                                                                                                                                                                                           | 29 |
| Figure 13 - Pression, dimensions et variables .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 31 |
| Figure 14 - Les objectifs à mesurer.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 35 |
| Figure 15 - Critères auxquels doit répondre l'indicateur selon les acteurs .....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 35 |
| Figure 16 - L'azote, de la pression à la pollution en contexte généralisé .....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 38 |
| Figure 17 - L'azote, de la pression à la pollution dans le contexte réunionnais .....                                                                                                                                                                                                                                                               | 37 |
| Figure 18- Schéma du modèle conceptuel de l'indicateur .....                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 41 |
| Figure 19 - Histogramme de la répartition des résultats de balance azotée/ha calculées pour RA et pour RB.....                                                                                                                                                                                                                                      | 46 |
| Figure 20 - Comparaison des résultats de balance azotée pour RA et pour RB.....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 47 |
| Figure 21 - Carte de la balance azotée à l'hectare calculée à la parcelle selon RA .....                                                                                                                                                                                                                                                            | 48 |
| Figure 22 - Carte de la balance azotée à l'hectare calculée à la parcelle selon RB .....                                                                                                                                                                                                                                                            | 49 |
| Figure 23 - Résultat de la lame d'eau calculée par parcelle.....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 50 |
| Figure 24 - (a) les précipitations quotidiennes, (b) pluviométrie cumulée à z = 90 cm, (c) azote inorganique absorbé par les racines de la plante cumulé et (d) les nitrates lixiviés à z = 90 cm. Le moment et la quantité d'azote ((NH4) 2 SO4) appliquée sont indiqués par des flèches et des doses. Extrait de (Endo <i>et al.</i> , 2009)..... | 51 |
| Figure 25 - Part d'azote lixiviée en fonction de la pluviométrie.....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 53 |
| Figure 26 - Histogrammes de la répartition des résultats d'azote lixivié obtenus pour RA et pour RB .....                                                                                                                                                                                                                                           | 53 |
| Figure 27 - Comparaison des résultats de l'azote lixivié obtenus pour RA et pour RB .....                                                                                                                                                                                                                                                           | 54 |
| Figure 28 - Carte de l'azote lixivié à l'hectare calculé à la parcelle selon RA.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 55 |
| Figure 29 - Carte de l'azote lixivié à l'hectare calculé à la parcelle selon RB .....                                                                                                                                                                                                                                                               | 56 |
| Figure 30 - Comparaison des quantités d'azote lixiviées par masse d'eau calculées selon RB en fonction de RA .....                                                                                                                                                                                                                                  | 57 |
| Figure 31 - Contribution des classes de culture à la lixiviation totale d'azote sur les masses d'eau superficielles selon les répartitions A et B .....                                                                                                                                                                                             | 58 |
| Figure 32 - Résultat de l'agrégation de l'azoté lixivié à l'échelle de la parcelle RA.....                                                                                                                                                                                                                                                          | 59 |
| Figure 33 - Résultat de l'agrégation de l'azoté lixivié à l'échelle de la parcelle RB .....                                                                                                                                                                                                                                                         | 60 |
| Figure 34 - Evolution de la concentration en nitrates dans les cours d'eau réunionnais de 2011 à 2015 ...                                                                                                                                                                                                                                           | 61 |

# Tableaux

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 - Caractéristique des principaux types de sols à La Réunion .....                                                                | 16 |
| Tableau 2 - Synthèse de la comparaison et de l'analyse des méthodes d'évaluation de la pression azotée d'origine agricole existantes ..... | 23 |
| Tableau 3 - Indicateur de la pression azotée utilisé lors de l'état des lieux 2013 .....                                                   | 24 |
| Tableau 4 - Indicateur de la pression de l'élevage utilisé lors de l'état des lieux 2013.....                                              | 24 |
| Tableau 5 - Les étapes de la démarche méthodologique .....                                                                                 | 26 |
| Tableau 6- Sollicitations des acteurs au cours de la démarche.....                                                                         | 30 |
| Tableau 7 - Facteurs, variables et données disponibles.....                                                                                | 39 |
| Tableau 8 - Résultat de l'estimation des besoins annuels par classe de culture.....                                                        | 42 |
| Tableau 9 - Extrait du fichier de données fourni par la douane sur les importations d'engrais en 2015 ....                                 | 43 |
| Tableau 10 - Résultat de la répartition de l'azote minéral par classe de culture selon les acteurs (A) et selon les besoins (B) .....      | 44 |
| Tableau 11 - Taux de répartition de l'azote organique par classe de culture selon les acteurs.....                                         | 45 |
| Tableau 12 - Résultat de la répartition de l'azote organique par classe de culture et par commune en kg N/ha.....                          | 45 |
| Tableau 13 - Estimation des balances azotées annuelles.....                                                                                | 52 |
| Tableau 14 - Pluviométrie, fertilisation et azote lixivié .....                                                                            | 52 |
| Tableau 15 - Comparaison des masses d'eau polluées et des résultats.....                                                                   | 65 |
| Tableau 16 - Calcul des concentrations en azote des cours d'eau à partir de nos estimations.....                                           | 67 |

# Introduction générale

L'azote est un élément essentiel à la croissance des cultures. La présence de nitrates est naturelle dans les eaux de pluie et dans les sols cependant l'agriculture constitue une source d'azote supplémentaire via les apports d'**engrais** et de **matière organique**. La fertilisation minérale ou l'épandage des effluents d'élevage peuvent provoquer des pollutions azotées si la dose appliquée est trop forte ou si les conditions d'application sont mauvaises. Les apports en **engrais** minéraux, sous forme de nitrates ou d'ammonium, sont facilement assimilables par les végétaux mais, ces formes étant les plus mobiles, elles peuvent rapidement migrer vers les nappes. En effet, les nitrates étant des anions peu retenus par le complexe argilo-humique du sol parce que chargés négativement, ils sont très solubles dans l'eau. Les épandages de **matières organiques** ne sont pas entièrement assimilables par les plantes directement après l'apport. Leur minéralisation progressive entraîne une libération lente de nitrates qui peut s'étendre sur plusieurs années. Ainsi, au flux naturel de nitrates lixiviés peuvent s'ajouter ceux provenant de la fertilisation. S'ils ne sont pas consommés par la culture ou réorganisés dans la matière organique du sol ou si de fortes pluies ont lieu après l'application, les nitrates percolent dans les eaux de surface ou souterraines. L'azote peut alors rapidement devenir un polluant pour le milieu (Molénat, et al., 2011), dont les conséquences sanitaires et environnementales peuvent être lourdes.

L'enjeu environnemental concerne la qualité des milieux aquatiques : une concentration excessive d'azote entraîne l'eutrophisation des eaux, stagnantes ou à débit lent, et l'acidification des sols. Cela se traduit par une prolifération d'algues qui diminue l'infiltration de la lumière et raréfie l'oxygène. Il en découle une modification de l'écosystème et la disparition de certaines espèces. L'excès d'azote peut aussi devenir dangereux pour la santé humaine (cancer, dysfonctionnement thyroïdien, réduction des capacités de transport de l'oxygène sanguin, etc.) si l'eau consommée en contient en concentration trop élevée (Pau Vall & Vidal, 1999) (Sutton, et al., 2011).

La Directive Cadre Européenne sur l'eau (2000/60/CE) s'en préoccupe et prévoit d'évaluer et de mesurer la pression azotée sur les cours d'eau via un bilan des états des lieux tous les six ans. En 2013, c'est l'Office de l'eau et la DEAL qui ont commandité cette évaluation à La Réunion. Cependant, le contexte très spécifique de ce DOM rend la tâche complexe. En effet, les méthodes d'évaluation utilisées en métropole n'étaient pas transposables à ce territoire pour trois raisons : les indicateurs ne reflétaient pas les bons processus physiques de pollution puisque ceux-ci sont différents en territoire insulaire volcanique tropical, les données disponibles sont limitées par rapport à celles de la métropole ce qui ne permet pas de calculer certains indicateurs, enfin, certaines données n'étaient pas accessibles, c'est-à-dire qu'elles ne circulaient pas, à cause du manque d'implication de certains acteurs. Aucune autre méthode n'avait encore été développée pour répondre à cette insuffisance. Le même problème a été identifié dans les autres DOM (Guadeloupe, Martinique, Guyane et Mayotte). Ainsi, aujourd'hui, on ne dispose pas d'outils pertinents d'évaluation de la pression azotée à l'échelle de la masse d'eau adapté à ces territoires.

Pour répondre à cette demande, le projet PRESAGRIDOM a été commandité par l'ONEMA (Office national de l'Eau et des milieux Aquatiques) auprès du CIRAD. Les objectifs fixés sont les suivants :

- Développer des méthodes d'évaluation des pressions agricoles spécifiques aux Départements d'outre-mer
- Améliorer la réalisation du prochain état des lieux en 2019 qui permettra de réorganiser et d'adapter le programme d'action du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux qui en découle (Boussier, 2015).

Pour cela, quatre stages ont été réalisés en parallèle dans les DOM (La Réunion, Martinique, Guadeloupe et Guyane) en 2015. Le but était alors d'identifier les données disponibles et accessibles sur chaque territoire et d'évaluer la qualité et la pertinence de ces données pour la construction d'indicateurs.

Pour cette année 2016, les travaux ont plus spécifiquement portés sur la construction des indicateurs de pression pour chacun des DOM. Le projet prend en compte les pressions agricoles dans leur globalité. Cependant, la problématique de la pollution azotée étant plus présente à La Réunion, ce stage s'est focalisé sur cette question tout en assurant le rôle d'interface entre les acteurs réunionnais et les porteurs du projet aux Antilles qui, eux, se sont concentrés sur le sujet des pressions liées aux produits phytosanitaires.

Ce mémoire retranscrit la recherche d'un outil mesurant la pression azotée adapté au contexte de La Réunion.

Nous commencerons par présenter l'état de l'art sur notre problématique : (1) nous verrons le contexte réglementaire de la gestion de l'eau au niveau européen et comment cette réglementation est appliquée à La Réunion, (2) nous décrirons l'agriculture et la pression azotée qu'elle engendre sur ce territoire, (3) nous nous intéresserons au processus de pollution azotée de manière générale et dans le contexte spécifique de notre cas d'étude. Enfin, (4) nous définirons les concepts relatifs aux indicateurs de pression, nous passerons en revue les différentes méthodes d'évaluation de la pression azotée d'origine agricole existantes.

Après avoir détaillé notre méthode de travail, nous présenterons les objectifs et attentes des acteurs identifiés vis-à-vis du futur indicateur. Nous élaborerons une représentation partagée du processus de pollution azotée dans le contexte spécifique de La Réunion afin de définir les facteurs majeurs affectant le phénomène étudié. Ces facteurs seront confrontés aux données disponibles et un modèle conceptuel d'indicateurs sera construit. L'indicateur sera calculé et spatialisé à l'échelle de la parcelle puis à l'échelle de la masse d'eau de deux manières : l'une tiendra compte de l'opinion des acteurs, l'autre sera construite de manière purement théorique. Nous pourrions ainsi discuter (1) de la pertinence des résultats par rapport à l'état actuel des masses d'eau de surface, (2) de l'apport de notre travail par rapport à la méthode utilisée lors du dernier état des lieux, (3) et de l'apport d'une démarche participative face à une approche théorique. Nous présenterons les limites de notre travail et les points à améliorer pour conclure sur les conditions de transposition de l'indicateur aux autres DOM.

# **Partie 1**

## **Revue bibliographique**



# I - Le contexte réglementaire

## 1. La Directive Cadre Européenne et les objectifs pour 2021

Une Directive Cadre Européenne sur l'eau a été adoptée par l'Union Européenne en 2000. Son objectif général est d'assurer la gestion équilibrée et durable de la ressource en eau et de préserver et restaurer le bon état de cette ressource (Union Européenne, 2000).

La gestion de l'eau est pensée par bassin versant, c'est-à-dire, par zone drainant l'ensemble de ses eaux vers un exutoire commun (cours d'eau ou mer) (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2005).

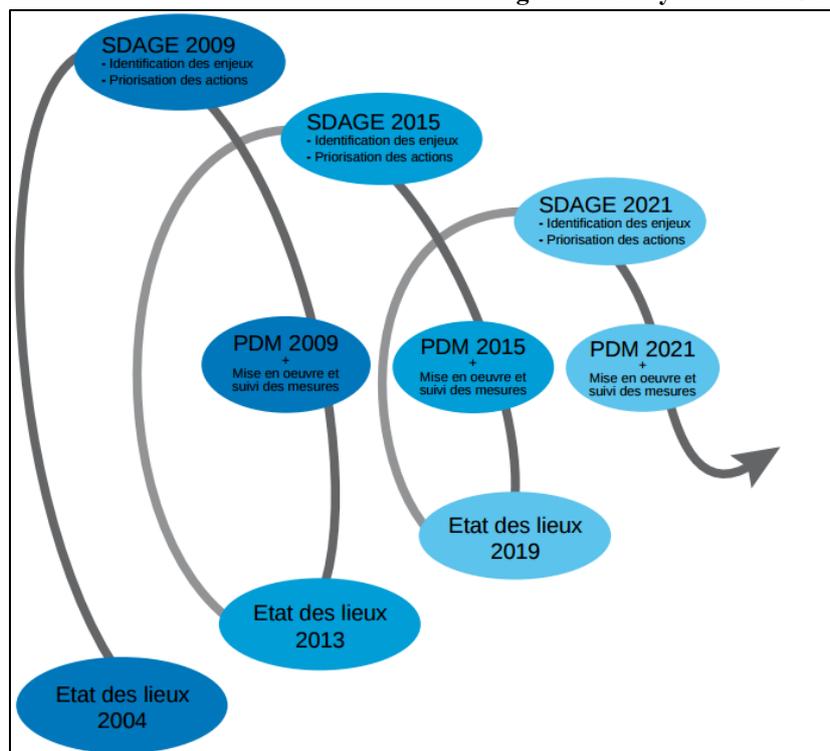
Les objectifs à atteindre par les États membres sont les suivants :

- « l'atteinte du bon état des masses d'eau d'ici 2021, sauf dérogation motivée ;
- la non-dégradation des ressources et des milieux ;
- la non-augmentation de la concentration en polluants issus d'activités humaines dans les eaux souterraines ;
- la réduction progressive de la pollution due aux substances prioritaires et l'arrêt ou la suppression des émissions, rejets et pertes de substances dangereuses prioritaires ;
- le respect des objectifs des zones protégées » (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2012)

La caractérisation de « bon état » est motivée par trois critères :

- le bon état écologique ;
- le bon état quantitatif ;
- et le bon état chimique (Agence de l'eau Rhône-Méditerranée & Corse, 2011).

Figure 1 - Le cycle de la DCE



(Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2012)

La DCE a un cycle de gestion de 6 ans (Figure 1). Celui-ci se compose d'abord d'un état des lieux puis de la rédaction d'un plan de gestion : le SDAGE. Afin d'atteindre les objectifs que ce dernier a fixés, des programmes de mesures sont adoptés et un suivi des masses d'eau est réalisé pour surveiller leur évolution. Si certains objectifs ne sont pas atteints à la fin du cycle, des dérogations peuvent être appliquées aux masses d'eau en question. Les paramètres à surveiller, la fréquence de suivi et la définition du réseau de stations de suivi sont définis dans un programme de surveillance des masses d'eau (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2012).

## **2. La directive nitrates**

Une section de la Directive Cadre Européenne sur l'eau concerne spécifiquement la question de la pollution par les nitrates d'origine agricole : la directive nitrate. Elle a pour but de protéger la qualité de l'eau en prévenant les pollutions azotées. Sa mise en œuvre passe par cinq étapes :

- l'identification des eaux de surface ou souterraines polluées et à risque de pollution par les nitrates ;
- la désignation de zones vulnérables qui alimentent les masses d'eau précédemment identifiées ;
- la mise en place de codes de bonnes pratiques à mettre en place volontairement par les agriculteurs ;
- l'élaboration de programme d'action à mettre en œuvre par les exploitations agricoles situées sur les zones vulnérables ;
- la centralisation des informations à l'échelle nationale (ONEMA, 2012).

## **3. L'état des lieux**

L'état des lieux qui précède la rédaction du SDAGE est une étape primordiale pour assurer des politiques et une gestion de la ressource adaptée aux problématiques du territoire. Il se divise en trois parties. La première permet de constater l'état initial des masses d'eaux, leurs utilisations et les pressions qui pèsent sur elles. La deuxième consiste en l'évaluation du potentiel hydroélectrique sur le territoire. Pour finir, une troisième partie est destinée à l'estimation de tendances et à l'élaboration de scénarios afin de projeter dans le futur les usages et leurs impacts sur le milieu (ACTeon. MEDDE. Les agences de l'eau, 2015).

Nos travaux s'insèrent dans le premier volet de l'état des lieux puisqu'ils sont destinés à l'évaluation d'une pression sur les masses d'eau : la pression azotée d'origine agricole.

## **4. La gestion de l'eau : de la DCE au bassin versant**

Pour assurer l'atteinte des objectifs de la DCE, les acteurs agissent à plusieurs échelles. Chacun a un rôle bien défini. À l'échelle nationale, la direction en charge de l'eau au Ministère de l'Environnement charge les établissements publics du développement des méthodes et des outils pour la mise en œuvre de la Directive Cadre Européenne. À l'échelle régionale, le préfet coordinateur de bassin veille au respect de la DCE. C'est l'intermédiaire entre l'agence de l'eau et le comité de bassin. Au niveau local, c'est-à-dire à l'échelle du bassin versant, le comité de bassin définit la politique et les actions à mettre en place, pilote et révisé le SDAGE. L'Agence de l'eau (ou Office de l'eau) effectue les contrôles de surveillance de la qualité physico-chimique et le suivi de la qualité des eaux et appuie financièrement et techniquement les maîtres d'ouvrage (Boussier, 2015).

## **5. Cas de La Réunion**

À La Réunion, 27 masses d'eau superficielles, dont 13 eaux côtières, et 26 masses d'eau souterraines ont été recensées. L'objectif pour 2021 est d'atteindre un bon état pour 36 % des cours d'eau, 33 % des plans d'eau, 58 % des eaux côtières et 85 % des masses d'eau souterraine (Comité de Bassin de La Réunion, 2010).

L'état des lieux de 2013 a été commandité par le Comité de bassin. C'est la DEAL qui s'est chargée de sa réalisation en sous-traitant l'évaluation par masse d'eau. L'état et les pressions sur les eaux de surface ont été appréciés par la Safège, ceux sur les eaux littorales par Pareto et, finalement, ceux sur les eaux souterraines par le BRGM. Les fournisseurs de données étaient uniquement institutionnels : les données issues des organismes de recherche ou de bureaux d'étude n'ont pas été mobilisées.

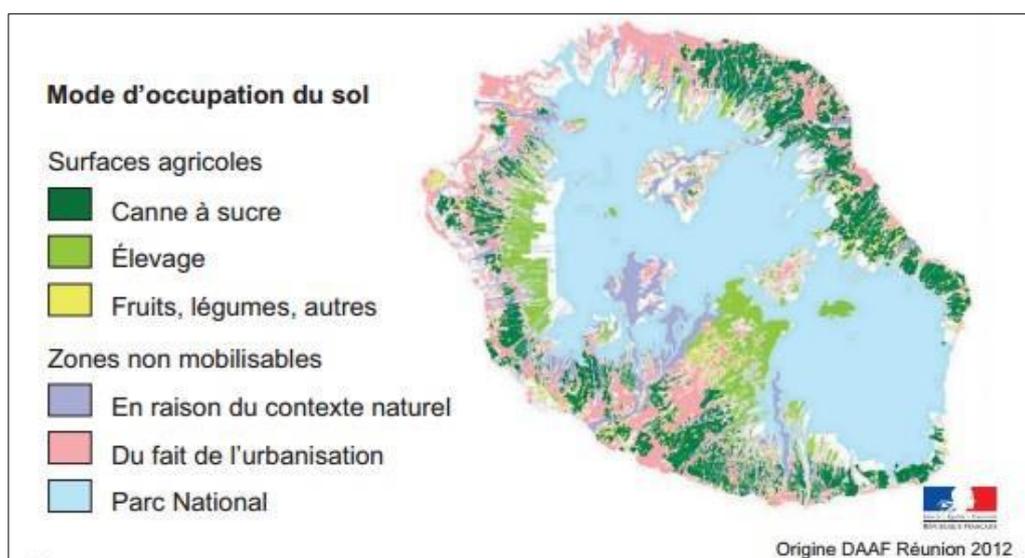
## II - L'agriculture et la pression azotée à La Réunion

### 1. L'agriculture réunionnaise

L'agriculture sur l'île de La Réunion emploie aujourd'hui 4 % des actifs et contribue à 1,2 % de la création de richesses. Le nombre d'exploitations a baissé ces dernières années. Bien que les petites exploitations soient toujours dominantes, le nombre d'exploitations ayant une surface agricole utile de 20 à 100 ha est en constante augmentation (IEDOM, 2015).

Une forte pression foncière pèse sur ce secteur. En effet, les reliefs très marqués limitent son expansion et l'urbanisation a réduit les surfaces agricoles utiles. La surface agricole utile totale s'élève aujourd'hui à 42 081 ha. La culture très dominante est la canne à sucre avec 24 482 ha, soit 58 % de la surface agricole utile. Les cultures fruitières et maraîchères occupent 6 722 ha et l'élevage couvre 10 877 ha du territoire (DAAF La Réunion, 2015).

Figure 2 - Occupation du sol à La Réunion



Source : METEO La Réunion, 2012

L'assolement des cultures est établi en fonction du relief de l'île. Ainsi, la canne à sucre s'est imposée près du littoral alors que les cultures maraîchères, fruitières et l'élevage se situent sur les hauteurs (Figure 2) On trouve des systèmes irrigués à l'ouest de l'île, là où les précipitations sont moins présentes. Ceci a permis une diversification et une intensification des cultures dans cette zone (Raunet, 1991).

La canne à sucre est une culture adaptée aux forts vents et précipitations. Grâce à son système racinaire très développé et à la souplesse de sa tige, la plante craint peu les fortes intempéries. Elle permet aussi de structurer le sol, de limiter l'érosion et le mulch, issu de l'« épauillage » (lorsque l'on arrache les feuilles sèches adhérentes aux tiges de cannes et qu'on les laisse en couverture du sol à la récolte), forme une couverture et un apport en matière organique (Boussier, 2015). L'écume, les cendres de bagasse et les pailles peuvent aussi servir d'amendement organique pour les sols (Syndicat du sucre, 2013).

En ce qui concerne les productions de fruits et légumes, le climat tropical humide et le fort ensoleillement de l'île permettent de cultiver de nombreuses espèces (IEDOM, 2015). On retrouve les principales cultures de légumes suivantes : tomates, salades, « brèdes » (légume feuille), choux et chouchous. Celles-ci représentent les deux tiers de la production totale et couvrent 70 % du marché local (Boussier, 2015).

La production fruitière assure 70 % des besoins alimentaires. Elle couvre 6 % de la surface agricole utile totale (Boussier, 2015). Les principaux produits sont l'ananas, la banane, les agrumes et les litchis (IEDOM, 2015).

Une part importante de la viande consommée à La Réunion est issue des importations (60 %). Les productions avicoles et porcines dominent, bien que l'on trouve tous types d'élevages sur l'île. Aujourd'hui, la production de viande diminue malgré la mise en place de projets de développement pour

des raisons de coûts d'accès à l'eau et de coûts des aliments d'élevage, mais aussi par manque de surface pour épandre les effluents (Boussier, 2015). La Réunion reste cependant le DOM le plus producteur de produits issus de l'élevage (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2015).

## **2. La pression azotée d'origine agricole**

Selon Cabidoche *et al.* (2002), à l'exception de la canne à sucre, les apports azotés sur les cultures dans les DOM sont souvent excédentaires par rapport aux besoins des cultures. Bien que très peu de données existent sur les pratiques de fertilisation à La Réunion, pour la banane, par exemple, les préconisations sont de 400 kg d'azote par hectare pour un objectif de rendement de 40 t/ha, avec seulement 80 kg d'azote exportés et 200 kg immobilisés par la plante (excédent de 120kg/ha). Concernant les cultures maraichères, une récente étude de la DAAF a été réalisée sur les pratiques culturales à La Réunion pour quatre principales cultures : la carotte, le chou, la salade et la tomate. Les résultats montrent que les doses moyennes d'azote apportées par cycle de culture excèdent les besoins d'1 kg d'azote par tonne produite dans le cas de la salade et du chou (DAAF La Réunion, 2016). Une problématique supplémentaire est propre à La Réunion : les chargements des prairies peuvent atteindre plus de 5 UGB/ha (Cabidoche, et al., 2002), sachant qu'il y a un risque important de pollution azotée à partir de 1,5 UGB/ha (Simon, et al., 1997). L'élevage hors-sol s'est développé dans certaines zones de ce territoire. Les fortes productions de matières organiques combinées aux faibles surfaces épandables disponibles sur l'île entraînent des risques localisés de pollution par les nitrates importants (Cabidoche, et al., 2002). Les surfaces potentiellement épandables correspondent à environ 60 % de la SAU à l'échelle de l'île (DAF, CIRAD, 2007).

Bien que les taux de nitrate n'aient jamais franchi jusqu'alors le taux maximal autorisé pour la consommation humaine à La Réunion, une tendance à la hausse des taux de nitrate a été notée sur certaines masses d'eau souterraines lors de l'état des lieux de 2013 (Comité de Bassin de La Réunion, 2013).

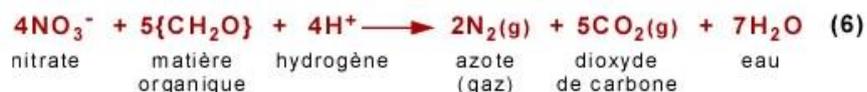
Selon Vayssière (2008), la situation de la gestion de l'azote sur l'île est préoccupante. En effet, ce dernier souligne que le territoire est caractérisé par une pression foncière forte qui a des conséquences sur les élevages. Ceux-ci, situés sur les hauteurs de l'île, sont contraints de mettre en place des chargements animaux élevés. La production fourragère étant insuffisante, les éleveurs utilisent souvent des quantités importantes d'engrais minéraux sur leurs terres et des aliments concentrés pour nourrir leur bétail. Des risques liés à ces pratiques peuvent provenir de la sur-fertilisation minérale ou organique, par épandage des effluents sur une zone épandable restreinte, mais aussi d'un chargement trop important des prairies. Cette situation s'oppose à celle des Bas de l'île, où domine la culture de la canne et le maraîchage : cette zone est caractérisée par une forte demande d'engrais. Malheureusement, les effluents d'élevage sont difficilement transportables et sont majoritairement épandus sur une zone limitée autour de l'exploitation qui les produit. Plusieurs projets ont été instruits, notamment par le Cirad, pour développer les échanges entre fourniture d'engrais organiques et substituts fourragers comme la paille de canne à sucre entre les Hauts et les Bas de l'île, par exemple, via la mise en place de production de compost, plus transportable. On a aussi cherché à communiquer des références techniques de bonnes pratiques de fertilisation organique auprès des agriculteurs (Vayssières, 2008). Un suivi de cette pression agricole est indispensable pour évaluer la réussite de telles actions et en préconiser d'autres si besoin, puisque le risque de pollution azotée localisée est bel et bien présent. Il faut agir aujourd'hui afin d'éviter le dépassement des taux seuils de pollution dans le futur.



Soit :



- La dénitrification : les bactéries réduisent les nitrates en azote sous forme de gaz (Bourque, 1997).



La matière organique subit une dégradation avant de pouvoir être absorbée par les cultures. Cette dégradation, appelée aussi minéralisation primaire, passe par une décomposition des molécules composant la matière (sucres, amidon, cellulose, lignine, lipides et protéines). Les protéines sont alors transformées en acides aminés puis en urée. L'ammonisation convertit l'urée en ammoniac puis, la nitrification, l'ammoniac en nitrates. Un autre processus peut alors intervenir : l'humification. Les produits issus de la décomposition sont restructurés et aboutissent à une molécule complexe : l'humus stable. L'humus pourra ensuite être minéralisé suivant le même processus précédemment décrit, c'est la minéralisation secondaire. Ainsi, dans le sol, les processus d'humification et de minéralisation sont constants et dépendent des entrées et sorties d'azote, du type de sol et de son état biologique (Chabalier, et al., 2006).

## Conclusion

L'azote subit beaucoup de transformations et les processus influant sur la quantité de nitrates disponibles dans les sols sont nombreux. Pour construire un indicateur simple et représentatif, il paraît nécessaire de choisir les processus de transformation dominants à La Réunion à représenter et les variables qui les évaluent le mieux.

## 2. Les processus hydrologiques

Les nitrates sont la molécule minérale azotée la plus stable dans les sols. Très solubles, ils sont transférés entièrement sous forme dissoute (Molénat, et al., 2011). Pour bien comprendre les phénomènes de déplacement de l'azote, il est nécessaire de connaître les processus hydrologiques en général et, plus particulièrement, dans ceux qui sont majoritaires dans le contexte de La Réunion.

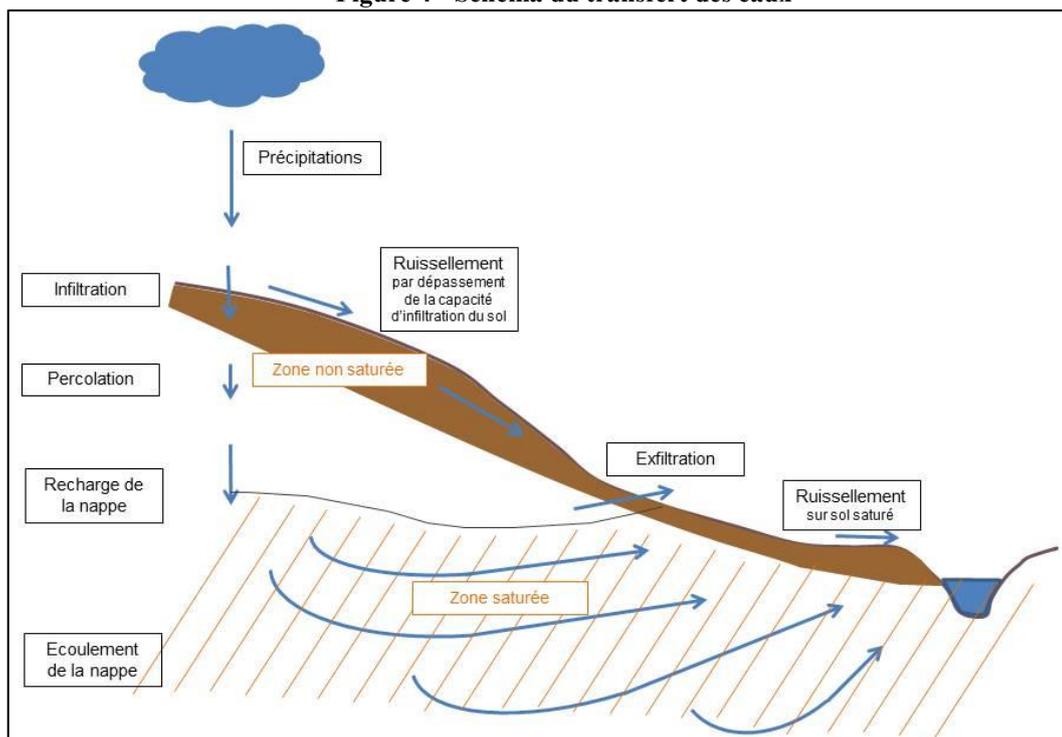
### A. Généralités

Les transferts de nitrates dépendent de l'hydrologie. Plusieurs voies de transfert sont possibles en fonction de la circulation de l'eau (Figure 4).

#### a) L'infiltration, la percolation et l'exfiltration

Lors d'une pluie, si le sol est perméable et non saturé, l'eau qui arrive à sa surface est infiltrée. L'infiltration dépend de trois facteurs : le type de sol, son état structural et son humidité initiale. Une partie de cette eau qui a pénétrée dans le sol va descendre verticalement jusqu'à la nappe par les porosités fines du sol ou par les macropores : c'est la percolation. Lorsque le sol n'est plus en capacité de transmettre entièrement le flux de nappe, celle-ci s'écoule alors à sa surface. On appelle ce phénomène l'exfiltration (Molénat, et al., 2009).

Figure 4 - Schéma du transfert des eaux



Source : Molénat, et al., 2009

#### *b) Le ruissellement*

Lorsque l'eau issue de la pluie n'est pas infiltrée dans le sol, elle s'écoule à sa surface, c'est le ruissellement. Celui-ci peut avoir deux causes :

- Le dépassement de la capacité d'infiltration du sol. C'est-à-dire que le sol n'est pas assez perméable pour permettre à toute l'eau de pluie de s'infiltrer. Ce phénomène est fonction de l'intensité de la pluie, de la structure du sol et de son humidité.
- Le ruissellement sur sol saturé : c'est lorsqu'une nappe peu profonde est présente. Les sols se saturent alors entièrement et l'infiltration est contrôlée par les écoulements dans la nappe et ces derniers sont souvent très faibles. Ce processus ne dépend pas de l'intensité des pluies mais du cumul de celles-ci et des conditions du milieu (Molénat, et al., 2009).

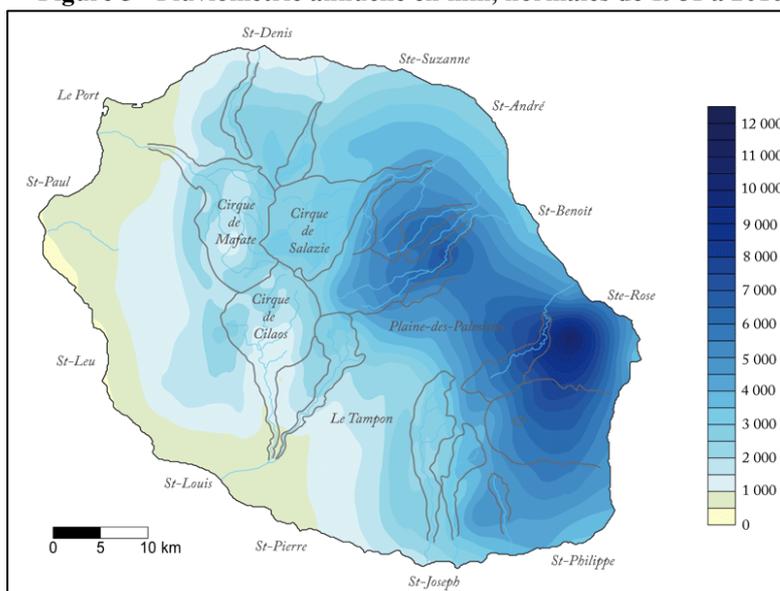
Afin d'assurer l'adaptation de l'indicateur au contexte pour lequel il est développé, se pose la question des processus de transfert dominants à La Réunion : quelle est la part de l'infiltration et du ruissellement et quel type de ruissellement intervient ?

## B. Le cas de La Réunion

### a) Climat

Le climat sur l'île est majoritairement tropical humide bien que l'on y recense plus de 250 microclimats. La saison des pluies a lieu de décembre à avril et la saison sèche, plus fraîche, est présente d'avril à novembre. On distingue deux régions climatiques. L'une sur la côte au vent, à l'est de l'île, se caractérise par des alizés forts et de fortes pluies (de 2000 à 12 000 mm/an). L'autre, sur la côte sous le vent, à l'ouest, est à l'abri des alizés. Elle est, par conséquent, moins humide (500 à 900 mm/an) (cf. Figure 5). Les températures dépendent surtout de l'altitude. Ainsi, elles varient de 10 à 20 °C en hauteur et montent de 20 à 30 °C à faible altitude (Météo France, 2015).

Figure 5 - Pluviométrie annuelle en mm, normales de 1981 à 2010



Source : Météo France

### b) Sols

On retrouve cinq types de sol sur le territoire avec une majorité marquée des andosols : ils représentent 50 % des sols réunionnais et plus de 70 % des sols cultivés (80 % si l'on considère l'ensemble des sols andiques) (Ziberlin, 2010). Ces derniers sont formés à partir de cendres volcaniques, ce sont donc des sols jeunes. Les andosols ont un fort taux de matière organique, une densité apparente faible, des pH souvent acides et une texture très fine, c'est-à-dire, qu'ils sont riches en argiles (Chabalier, et al., 2006). Ces argiles sont particulières puisque ce sont des allophanes, une espèce minérale à structure globulaire qui procure à ces sols des caractéristiques spécifiques : les andosols ont une capacité d'infiltration et de rétention d'eau très importante. Ils peuvent contenir de 100 à 250 % d'eau en poids sec, c'est-à-dire qu'1 kg de sol saturé ne pèsera plus que 250 g à l'état sec. Ils sont capables de retenir les anions et, par conséquent, les nitrates (CIRAD, CNRS, INRA, ORSTOM, 1988).

En plus faible quantité, des sols ferrallitiques, des sols bruns, des vertisols et des sols fersiallitiques sont présents sur le territoire (Ziberlin, 2010). Leurs caractéristiques sont résumées dans le Tableau 1 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Globalement, à l'échelle de l'île, le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration du sol semble rare et l'infiltration apparaît comme largement dominante.

Tableau 1 - Caractéristique des principaux types de sols à La Réunion

| Type de sol         | Andosol           | Sol ferrallitique | Sol brun        | Vertisol      | Sol fersialitique |
|---------------------|-------------------|-------------------|-----------------|---------------|-------------------|
| <b>Acidité</b>      | Forte             | Moyenne           | Faible          | Faible        | Moyenne           |
| <b>Texture</b>      | Limoneux-argileux | Argileux          | Argilo limoneux | Très argileux | Argileux          |
| <b>Perméabilité</b> | Forte             | Forte             | Moyenne         | Faible        | Moyenne à forte   |

Source personnelle

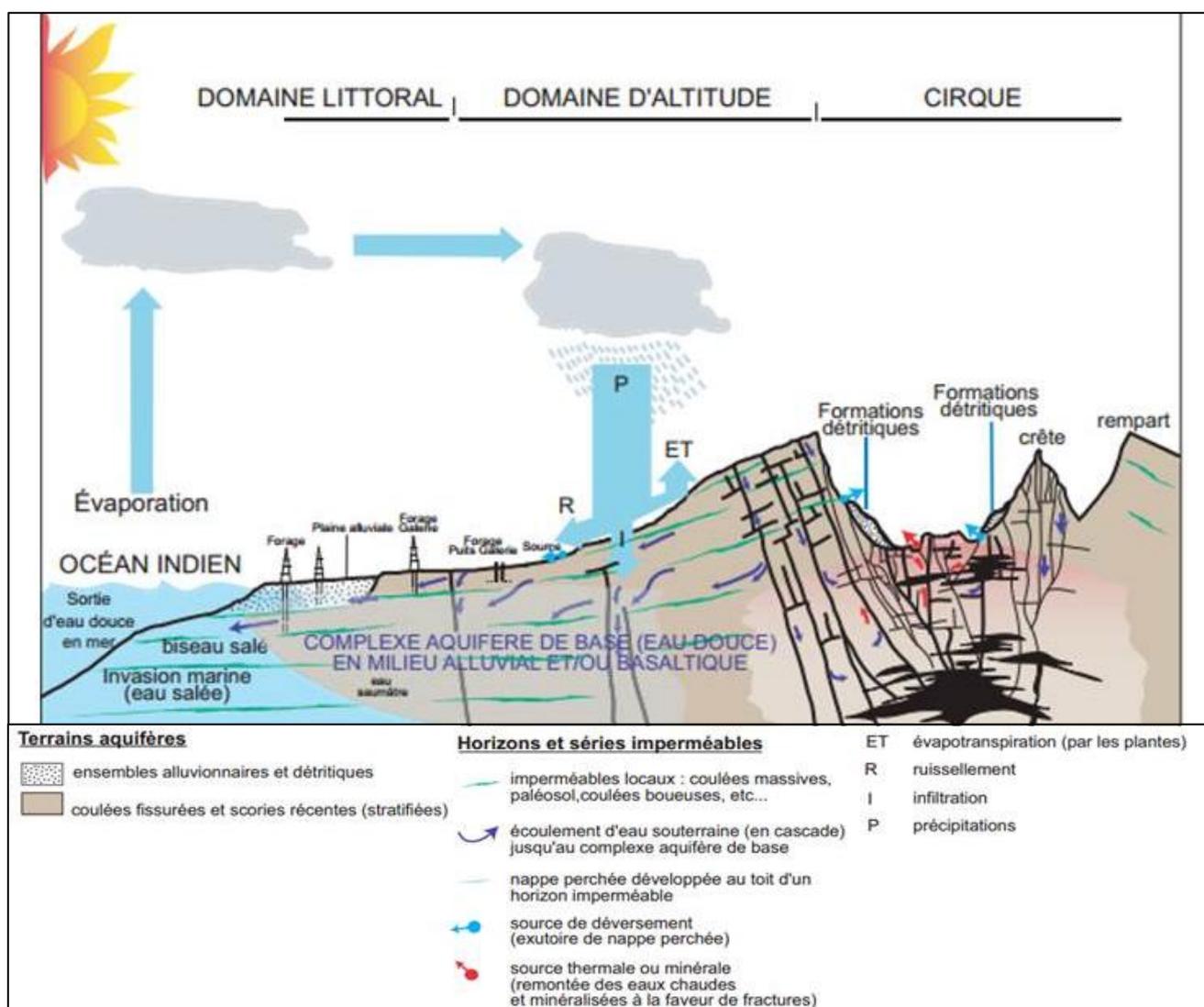


d] Hydrogéologie

Comme illustré sur la Source : BRGM, d'après l'atlas hydrogéologique, 1986, on distingue deux formes de nappes sur le territoire. La première, dite du domaine littoral, contient la nappe de base aussi appelée complexe aquifère de base. La deuxième est issue de la géologie particulière de l'île formée par une superposition de coulées de roches volcaniques. Celle-ci induit la présence de nappes perchées développées sur des horizons imperméables. On peut ainsi observer des sources de déversement qui sont l'exutoire de ces nappes ou encore des sources thermales qui sont des remontées des eaux chaudes dans les cirques ( BRGM, 2012).

La circulation souterraine majoritaire de l'eau peut se résumer ainsi : l'eau s'infiltré d'abord en surface puis les écoulements sont interceptés par des formations géologiques imperméables. Une nappe perchée se forme. L'eau peut être exfiltrée vers une source puis ruisseler vers un cours d'eau ou peut alimenter une cascade de nappes perchées dans les strates inférieures pour finir par retourner vers l'océan ( BRGM, 2012).

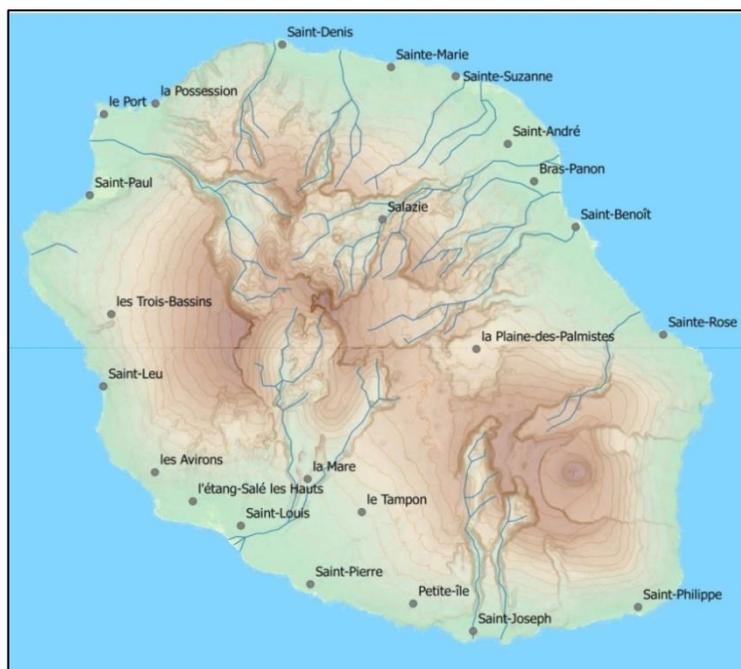
Figure 8 - Schéma conceptuel de l'hydrogéologie à La Réunion



Source : BRGM, d'après l'atlas hydrogéologique, 1986

Figure 9 - Carte du relief de La Réunion

La carte topographique de l'île (Figure 9) met en évidence la présence de fortes pentes autour des principaux cours d'eau. Ces masses d'eau paraissent encaissées dans de profonds canyons. Bien que les bassins versants soient définis dans ces encaissements. La présence importante de nappes perchées nous laisse supposer que ces dernières contribuent à l'alimentation des cours d'eau. Cela signifie que les surfaces de contribution aux masses d'eau de surface seraient plus importantes que ce que laisse présager la carte des reliefs.



Source : sig974.free.fr

### Conclusion

La voie de transfert prioritaire de l'eau de pluie étant l'**infiltration**, l'indicateur adapté au contexte de La Réunion devra considérer prioritairement **les transferts d'azote par lixiviation**. La question des surfaces de contribution aux cours d'eau est à étudier. En effet, ces dernières dépendent des nappes perchées et de leurs écoulements plus que de la topographie.

## IV - L'évaluation des pressions via des indicateurs

### 1. Notion d'indicateur

De nombreux auteurs ont tenté de définir la notion d'indicateur. Nous choisissons celle de l'OCDE (1993), selon laquelle, un indicateur est « *un paramètre ou une valeur dérivée de plusieurs paramètres donnant des informations sur un phénomène* » (OCDE, 1993). Nous la compléterons avec les précisions données par Le Plan Bleu, en qualifiant un indicateur « [d'] information finalisée ou « instrumentale » servant à caractériser une situation évolutive, une action ou les conséquences d'une action, de façon à les évaluer et à les comparer à leur état à d'autres dates passées ou projetées, ou aux états à la même date d'autres sujets similaires » (Plan Bleu, Plan d'Action pour la Méditerranée, Observatoire du Sahara et du Sahel, 1996).

Les indicateurs peuvent être quantitatifs ou qualitatifs et sont un moyen de synthèse, de simplification et de communication (Bilot, 2009).

Un bon indicateur a plusieurs qualités : il doit être pertinent, fiable et opérationnel (Balestrat, et al., 2010). Selon Mauziri et Verrel (2002), il doit être fondé sur des données sûres et facilement accessibles et être compris et accepté par ses utilisateurs. Les indicateurs sont des instruments politiques. Ils sont subjectifs et répondent à des besoins précis. Pour assurer leur opérationnalité, il est important d'identifier ces besoins et d'assurer leur appropriation par les futurs utilisateurs. Cette acceptation par les acteurs passe par un travail en partenariat, une réflexion collaborative et une implication des parties prenantes concernées (Balestrat, et al., 2010).

La construction d'indicateur peut se résumer en trois étapes. La première a pour but de bien **comprendre le phénomène étudié**. Cela passe par une identification des parties prenantes et de leurs motivations contrastées (Canneva & Guérin-Schneider, 2011) puis par la construction de la représentation du sujet de l'étude. Cette représentation peut se baser sur des connaissances scientifiques mais peut aussi intégrer une opinion dite « raisonnée » provenant des parties prenantes (Lange, et al., 2007). On cherchera à déterminer la stabilité de la représentation établie, c'est-à-dire, à savoir si elle est susceptible d'évoluer dans le temps ou en fonction des acteurs intégrés au processus (Bourdieu, 2001).

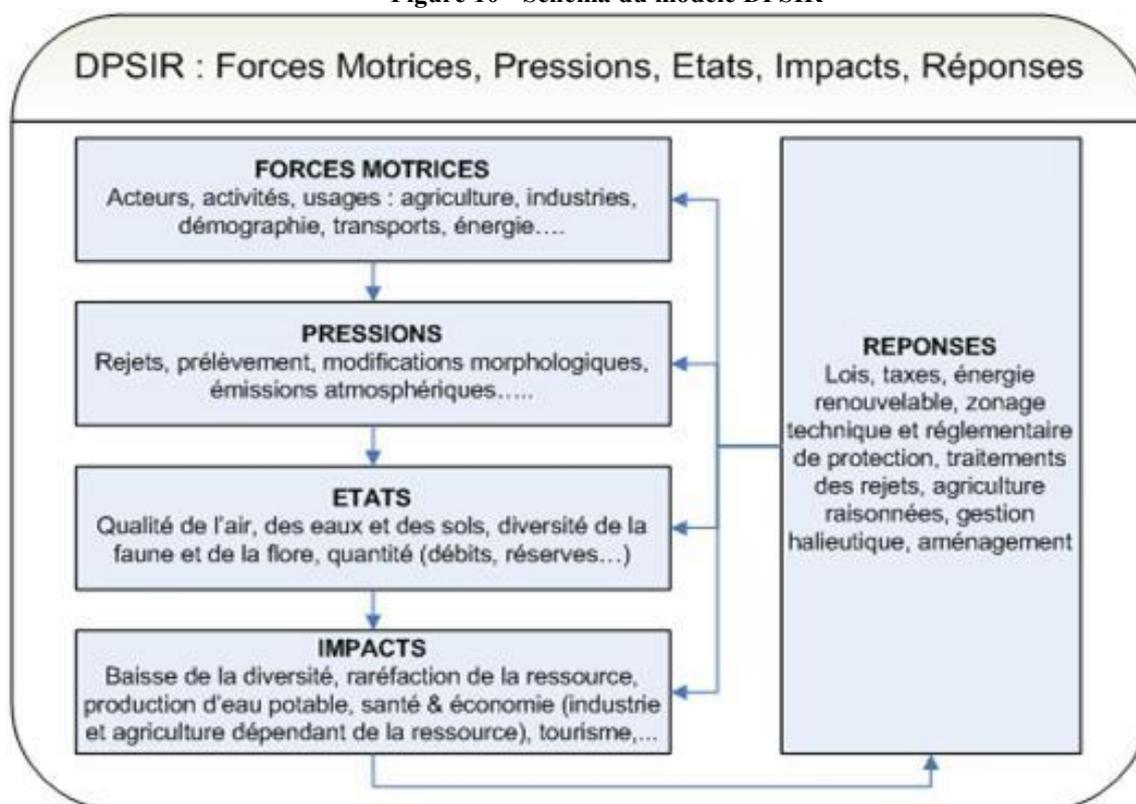
Vient alors l'**identification des variables d'intérêt** : les variables découlent directement de la représentation dressée précédemment. Le choix des variables devra se faire de sorte que le résultat produit soit en adéquation avec l'objet : de même ordre de grandeur, par exemple. Les mesures de ces variables doivent être homogènes pour les entités que l'on souhaite comparer. Enfin, les variables doivent respecter l'inertie du phénomène étudié. Autrement dit, leur échelle doit être adaptée au sujet (Gingras, 2008).

Finalement, l'étape de calcul ou de **mesure et de validation** : les variables sont confrontées aux données disponibles. Il faudra alors identifier les moyens et les méthodes de collecte des données afin de s'assurer que leur précision et de la fréquence des mesures soient suffisantes. On pourra alors calculer l'indicateur et interpréter les résultats en tenant compte des choix et des hypothèses formulées tout au long du processus de construction. L'indicateur doit être capable de qualifier le changement et de porter un jugement (bon/mauvais) conduisant à la décision (Cattan, 2015).

## 2. Notion de pression

Le modèle DPSIR (Figure 10) a été retenu par la Commission Européenne pour représenter les relations entre forces motrices, usages de la ressource, pressions et impacts sur les masses d'eau et les milieux. Ce modèle conceptualise les relations de causalité qui mènent à la dégradation d'une ressource et les actions correctives qui sont mises en place pour limiter sa dégradation ou la restaurer (Affeltranger, 2011).

Figure 10 - Schéma du modèle DPSIR



Source : [http://sig2010.esrifrance.fr/bassin\\_niger.aspx](http://sig2010.esrifrance.fr/bassin_niger.aspx)

Selon ce modèle, les forces motrices (driving forces), éléments moteurs, c'est-à-dire représentant des évolutions structurelles et sociales, entraîne des pressions anthropiques (pression) qui ont une influence directe sur l'environnement. L'état des ressources (state) est ainsi dégradé ce qui induit des impacts sanitaires et/ou environnementaux. Les réponses sont les mesures institutionnelles ou privées mises en place pour limiter les forces motrices, les pressions, la dégradation et les impacts et, par conséquent, pour conserver ou restaurer la ressource (Delache, 2002).

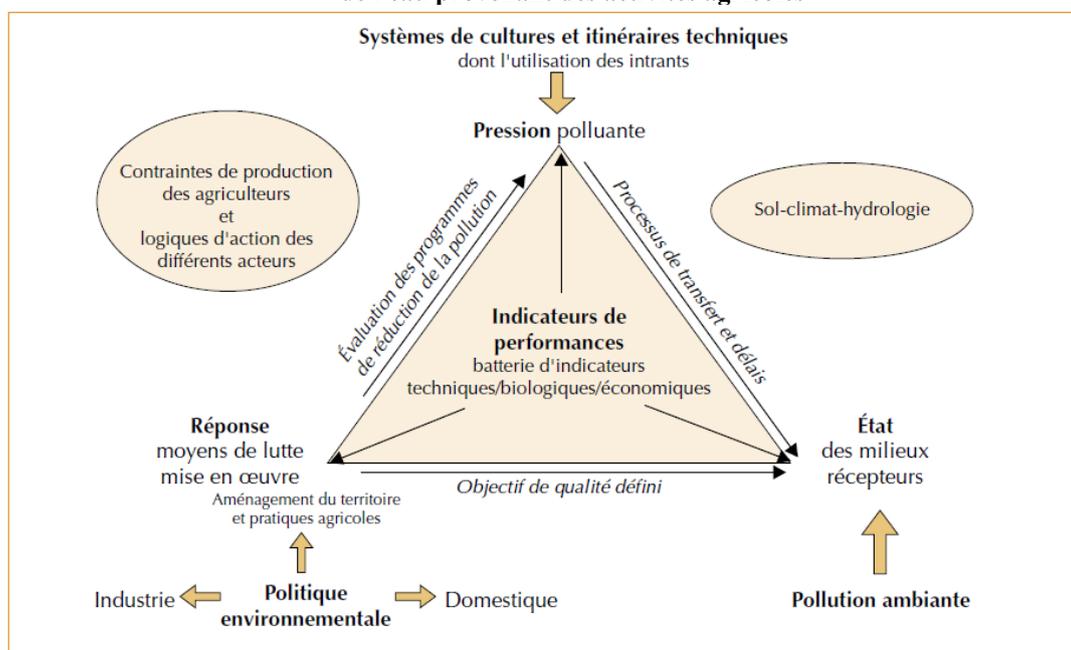
La notion de pression sur la ressource en eau s'intègre dans le cadre conceptuel de ce modèle. Elle peut être définie par « la traduction de l'exercice d'une activité humaine qui peut avoir une incidence sur les milieux aquatiques. Il peut s'agir de rejets, prélèvements d'eau, artificialisation des milieux aquatiques,

capture de pêche [...] Les pressions sont considérées comme la description quantitative ou qualitative des émissions et des utilisations de l'eau qui peuvent être la cause possible d'altérations des milieux » (Eaufrance, 2016).

L'étude des pressions a donc un grand intérêt : elle permet d'identifier les problèmes, de limiter les impacts des activités anthropiques sur l'environnement et de mieux gérer les ressources.

### 3. Les indicateurs permettant d'évaluer la pression

Figure 11 - Une représentation simplifiée de l'approche Pression-Etat-Réponse dans le cas des pollutions de l'eau provenant des activités agricoles



Source : CORPEN

On peut classer les indicateurs en trois catégories : les indicateurs de pression, ceux d'état et ceux de réponse (Figure 11). Les indicateurs de pression décrivent « la pression polluante exercée par les activités agricoles : utilisation des intrants, itinéraires techniques et systèmes de production en place » (Mauziri & Verrel, 2002).

Les indicateurs d'état caractérisent l'évolution de l'environnement récepteur de la pollution, l'impact sur le milieu, autrement dit, la qualité de l'eau. Les indicateurs de réponse évaluent les moyens de lutte mis en place pour diminuer la pollution, leur état d'avancement et leur efficacité en fonction de l'objectif fixé (Mauziri & Verrel, 2002).

Cette catégorisation des indicateurs a cependant certaines limites. Certains auteurs ont critiqué le modèle DPSIR pour ses notions parfois ambiguës. Par exemple, la pression peut faire référence aux pratiques agricoles ou aux émissions polluantes selon les auteurs. De plus, cette représentation est linéaire et fait paraître une chaîne causale mono-factorielle alors qu'en réalité les phénomènes de pollution dépendent de beaucoup de facteurs. Elle réduit ainsi considérablement la complexité de l'objet de l'étude (Bockstaller, et al., 2013). Cependant, ce modèle reste un très bon support à la discussion entre acteurs (Affeltranger, 2011).

Les relations entre pression – état – réponse mises en évidence par le modèle DPSIR pourraient permettre l'utilisation d'indicateurs de réponse et d'état pour évaluer la pression. En effet, l'état d'une ressource dépend de la pression qu'elle subit mais aussi des réponses mises en place pour éviter sa détérioration. Ainsi la concentration en nitrate d'origine agricole dans l'eau est la conséquence d'émissions générées par les pratiques de fertilisation. Cette concentration permet de mesurer indirectement la pression de ces pratiques. Une réponse pourrait être le changement de pratiques agricoles par la diminution des doses d'azote appliquées. Le taux d'agriculteurs qui changent leurs pratiques exprimerait alors une baisse de la pression. Il faut cependant être vigilant aux liens entre pressions, états et réponses. L'azote détecté dans

un cours d'eau peut très bien provenir de plusieurs sources différentes. Celui-ci n'est pas toujours issu de la pression agricole. Tout comme une réponse pourrait avoir des conséquences inattendues.

#### **4. Les principaux indicateurs existants pour mesurer la pression azotée**

Des méthodes d'évaluation existent déjà pour mesurer la pression azotée d'origine agricole. Le Tableau 2 fait une synthèse de 11 outils rencontrés dans la littérature.

Ces méthodes ont plusieurs objectifs : certaines tentent d'évaluer globalement la durabilité d'une exploitation agricole. Elles prennent en compte les dimensions environnementale, économique et sociale de la durabilité et n'évaluent donc pas uniquement l'aspect « pollution azotée » mais tous les impacts liés à l'activité agricole de l'exploitation (Dialecte, IDEA RUN, Grille du RAD et IndicIADES). Les autres sont plus spécifiques. Ainsi, on trouve des méthodes destinées à l'évaluation des pratiques agricoles pour un type de système de culture spécifique (Système pour les grandes cultures) ou spécialement dans les aires d'alimentation de captage (SOLEO). Pour répondre à son objectif, cette dernière se concentrera sur l'aspect environnemental et sur les impacts des pollutions pour les consommateurs de la ressource. Enfin, des outils sont destinés à évaluer les risques environnementaux liés au secteur agricole. Ils peuvent considérer tous les risques (DAE-G, Territ'eau) ou uniquement les risques de pollution par les nitrates (Merlin, Syst'N, NOPOLU).

Si tous les outils considèrent la quantité d'azote apporté et les besoins des cultures dans leur évaluation de la pression azotée, les autres facteurs intégrés diffèrent. Le type de fertilisant est très majoritairement pris en compte, c'est-à-dire que l'on ne va pas considérer les apports d'engrais minéraux de la même manière que ceux de matière organique. Les facteurs liés aux pratiques agricoles plus rarement intégrés sont le fractionnement, la rotation, l'irrigation, le travail du sol et, dans le cas des élevages, les apports via le pâturage. Concernant les facteurs « milieu », on retrouve le plus souvent le type de sol et la pluviométrie. Trois méthodes intègrent la présence de zones tampons et deux autres la minéralisation.

Les échelles de ces méthodes vont de la parcelle au bassin versant en passant par le système de culture et l'exploitation. Certaines intègrent un changement d'échelle dans leur calcul par une agrégation de parcelles pour arriver au bassin-versant (Territ'eau, NOPOLU).

Les résultats sont présentés sous plusieurs formes : les méthodes d'évaluation de la durabilité d'exploitations donnent un diagnostic sous forme de notations. Les outils d'évaluation des risques permettent d'obtenir deux types de résultat : soit des scores à la parcelle ou au bassin versant en fonction de l'échelle, ces scores permettent de hiérarchiser les entités de la plus risquée à la moins risquée ; soit une estimation quantifiée des pertes d'azote.

Les représentations du processus de pollution varient en fonction de l'outil. La majorité se contente d'établir une balance azotée pour évaluer la pression liée à l'azote (Grille du RAD, IndicIADES, IDEA RUN, NOPOLU, etc.). D'autres fonctionnent différemment, notamment DAE-G, Territ'eau, Merlin et Syst'N. DAE-G est un indicateur composite à deux dimensions : l'une étant la sensibilité du milieu, l'autre, les pertes potentielles d'azote dues aux pratiques agricoles. Territ'eau tient compte de la profondeur et de la lame drainante du sol, de la rotation des cultures et de l'écart au conseil au sujet de la fertilisation. Merlin est un indicateur composite à trois dimensions qui sont le sol, le climat et les pratiques de fertilisation. Enfin, Syst'N tente de simuler les flux d'azote à partir d'un modèle biotechnique plus complexe.

Aucune méthode n'a été développée pour répondre au contexte spécifique de La Réunion ou des DOM. Deux ont cependant été adaptées : IDEA RUN et Merlin. Finalement, pour chacun des outils, nous n'avons pas toutes les données d'entrée nécessaires à sa mise en œuvre.

**Tableau 2 - Synthèse de la comparaison et de l'analyse des méthodes d'évaluation de la pression azotée d'origine agricole existantes**

| Méthode                                                         | Dialecte                                          | IDEA RUN                                          | SYSTERRE                                                                                                             | Grille du RAD                                     | IndiciaDES                                        | SOLEO                                                                               | DAE-G                                                                                                                      | Territ'eau                                                                                     | Merlin (RUN)                                                                                                         | Syst'N                                                                  | NOPOLU-Agri                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Objectif</b>                                                 | Evaluer la durabilité d'une exploitation agricole | Evaluer la durabilité d'une exploitation agricole | Evaluer les performances techniques, économiques et environnementales des productions végétales sur une exploitation | Evaluer la durabilité d'une exploitation agricole | Evaluer la durabilité d'une exploitation agricole | Suivre l'évolution des pratiques agricoles dans les aires d'alimentation de captage | Evaluer les risques d'impacts des pratiques agricoles sur l'environnement Identifier et hiérarchiser les risques d'impacts | Evaluer et hiérarchiser les impacts des pratiques agricoles sur la qualité des eaux de surface | Evaluer qualitative-ment et hiérarchiser les risques de lessivage de nitrates en fonction de la culture et du milieu | Quantifier les pertes d'azote sur une parcelle ou un système de culture | Quantifier les surplus d'azote et les émissions de GES d'origine agricole et les localiser |
| <b>Facteurs pris en compte pour l'aspect pollution azotée</b>   | <b>Type de fertilisant</b>                        | X                                                 | X                                                                                                                    | X                                                 | X                                                 | X                                                                                   | X                                                                                                                          | X                                                                                              | X                                                                                                                    | X                                                                       | X                                                                                          |
|                                                                 | <b>Dose d'azote / Besoin culture</b>              | X                                                 | X                                                                                                                    | X                                                 | X                                                 | X                                                                                   | X                                                                                                                          | X                                                                                              | X                                                                                                                    | X                                                                       | X                                                                                          |
|                                                                 | <b>Rotations</b>                                  |                                                   |                                                                                                                      | X                                                 |                                                   |                                                                                     |                                                                                                                            | X                                                                                              |                                                                                                                      |                                                                         |                                                                                            |
|                                                                 | <b>Fractionnement des apports</b>                 | X                                                 | X                                                                                                                    | X                                                 |                                                   |                                                                                     |                                                                                                                            |                                                                                                |                                                                                                                      | X                                                                       |                                                                                            |
|                                                                 | <b>Irrigation</b>                                 |                                                   |                                                                                                                      | X                                                 |                                                   |                                                                                     |                                                                                                                            |                                                                                                |                                                                                                                      | X                                                                       |                                                                                            |
|                                                                 | <b>Travail du sol</b>                             |                                                   |                                                                                                                      | X                                                 |                                                   |                                                                                     | X                                                                                                                          |                                                                                                |                                                                                                                      |                                                                         |                                                                                            |
|                                                                 | <b>Apports liés au pâturage</b>                   | X                                                 |                                                                                                                      | X                                                 | X                                                 | X                                                                                   |                                                                                                                            |                                                                                                |                                                                                                                      |                                                                         | X                                                                                          |
|                                                                 | <b>Type de sol</b>                                |                                                   |                                                                                                                      | X                                                 |                                                   |                                                                                     |                                                                                                                            | X                                                                                              | X                                                                                                                    | X                                                                       | X                                                                                          |
|                                                                 | <b>Minéralisation</b>                             |                                                   |                                                                                                                      |                                                   |                                                   |                                                                                     |                                                                                                                            |                                                                                                | X                                                                                                                    | X                                                                       |                                                                                            |
|                                                                 | <b>Présence de zones tampon</b>                   | X                                                 |                                                                                                                      |                                                   |                                                   |                                                                                     | X                                                                                                                          |                                                                                                | X                                                                                                                    |                                                                         |                                                                                            |
| <b>Pluviométrie</b>                                             |                                                   |                                                   |                                                                                                                      |                                                   |                                                   |                                                                                     | X                                                                                                                          | X                                                                                              | X                                                                                                                    | X                                                                       |                                                                                            |
| <b>Echelle</b>                                                  | Exploitation                                      | Exploitation                                      | Parcelle, SdC, exploitation                                                                                          | Exploitation                                      | Exploitation                                      | Exploitation                                                                        | Parcelle                                                                                                                   | Bassin versant                                                                                 | Parcelle                                                                                                             | Parcelle                                                                | Bassin versant                                                                             |
| <b>Résultat</b>                                                 | Diagnostic d'exploitation                         | Diagnostic d'exploitation                         | Diagnostic d'exploitation                                                                                            | Diagnostic d'exploitation                         | Diagnostic d'exploitation                         | Diagnostic d'exploitation                                                           | Hiérarchisation risques / Diagnostic d'exploitation                                                                        | Hiérarchisation des risques                                                                    | Hiérarchisation des risques                                                                                          | Estimation des pertes d'azote                                           | Estimation des pertes d'azote                                                              |
| <b>Contexte pour lequel la méthode a été développée/adaptée</b> | Métropole                                         | Métropole/RUN                                     | Métropole                                                                                                            | Métropole                                         | Métropole                                         | Métropole                                                                           | Métropole                                                                                                                  | Métropole                                                                                      | Métropole/RUN                                                                                                        | Métropole                                                               | Métropole                                                                                  |
| <b>Données d'entrée disponibles</b>                             | Non                                               | Non                                               | Non                                                                                                                  | Non                                               | Non                                               | Non                                                                                 | Non                                                                                                                        | Non                                                                                            | Non                                                                                                                  | Non                                                                     | Non                                                                                        |

## 5. Pourquoi les indicateurs de métropole ne sont pas adaptés

La méthode d'évaluation de la pression azotée d'origine agricole utilisée en métropole lors de la réalisation de l'état des lieux exigé par la DCE est NOPOLU. Cette méthode consiste en l'estimation des surplus azotés par culture grâce à un bilan azoté (apports d'azote moins sorties d'azote) et en la spatialisation de ces surplus à partir d'une carte des assolements. L'estimation des surplus est calculée à partir de données d'enquêtes sur les pratiques culturales menées en métropole. NOPOLU ne prend pas en compte la sensibilité du milieu (Le Gall, 2015).

Cette méthode n'est pas adaptée au contexte de l'île de La Réunion pour plusieurs raisons. Tout d'abord, comme vu précédemment, l'île a des spécificités très différentes de la zone européenne continentale. Le climat y est tropical humide ce qui permet de cultiver des espèces sans références en métropole. Les besoins azotés de ces cultures sont, évidemment, différents de ceux des cultures métropolitaines. Le climat a aussi des conséquences sur les écosystèmes présents dont ceux du sol. Les processus intervenant dans le cycle de l'azote se feront à des vitesses différentes. La géomorphologie de l'île est très particulière : sa formation volcanique aboutit à une topographie caractérisée par de fortes pentes et la présence importante de nappes perchées formées sur les coulées de laves imperméables. Il est par conséquent impossible d'utiliser des données d'enquêtes réalisées en métropole comme référence pour ce département. De plus, la diversité climatique, au sein même de l'île de La Réunion ne permet pas de comparer différentes zones de ce territoire sans prendre en compte les différences de sensibilité de chacune d'elle.

Enfin, la gestion de l'eau sur l'île est plus récente et moins performante qu'en métropole : la création des Offices de l'Eau dans les DOM date de 2000 et les moyens de collectes de données sont plus limités (Boussier, 2015). On doit donc aussi s'adapter aux données disponibles sur la zone.

## 6. Insuffisance des indicateurs de l'état des lieux 2013

La DEAL Réunion a dû développer des indicateurs de pression azotée afin de réaliser l'état des lieux de 2013, première étape du cycle de gestion de la DCE. Deux indicateurs ont été utilisés, l'un portant sur la pression azotée issue des cultures, l'autre sur la pression de l'élevage, essentiellement construits sur l'utilisation de l'espace :

La pression azotée a été simplement évaluée par la surface agricole utile sur la surface totale du bassin versant et catégorisée selon le Tableau 3 :

Tableau 3 - Indicateur de la pression azotée utilisé lors de l'état des lieux 2013

| Pression   | %SAU / BV  |
|------------|------------|
| Sans objet | 0,00%      |
| Faible     | ] 0 ; 10]  |
| Modérée    | ] 10 ; 20] |
| Forte      | >20%       |

La pression de l'élevage a été calculée par le pourcentage du cheptel du bassin versant par rapport au cheptel total à La Réunion. Une note lui a été attribuée selon le Tableau 4.

Tableau 4 - Indicateur de la pression de l'élevage utilisé lors de l'état des lieux 2013

| Pression | %cheptel/cheptel Réunion |
|----------|--------------------------|
| Faible   | [0 ; 5]                  |
| Modérée  | ] 5 ; 10]                |
| Forte    | > 10%                    |

Les indicateurs de pression azotée et de pression de l'élevage font l'hypothèse que la surface agricole et le nombre d'animaux présents sur un bassin versant sont directement liés à la pression exercée sur le territoire. Or, les risques de pollutions azotées dépendent de la culture, des pratiques mises en place par les agriculteurs mais aussi de la sensibilité du milieu. Si la dose d'azote appliquée correspond aux besoins de la culture, il n'y aura pas ou peu de transfert dans les eaux, si la dose est supérieure aux besoins de celle-ci, son transfert dépendra des conditions pédoclimatiques et géomorphologiques (Molénat, et al., 2011).

La part du cheptel sur le bassin versant par rapport au cheptel total de La Réunion ne prend pas en compte la surface d'épandage sur le bassin versant. Une pression sera considérée comme forte alors que la surface d'épandage est grande ce qui permet de « diluer » considérablement la pression et inversement. Ici encore, les pratiques (particulièrement la gestion des effluents) et la sensibilité du milieu influent fortement sur le risque de pollution mais celles-ci ne sont pas considérées par l'indicateur. De plus, le chargement des parcelles n'est pas considéré : même si la part du cheptel sur le cheptel total de l'île est faible, ce petit cheptel peut-être concentré sur une petite surface, et, par conséquent, il y a risque d'excès de nitrates sur la zone concernée.

## V - Problématique, question de recherche et démarche générale

En résumé, pour appliquer les exigences de la DCE, une méthode d'évaluation de la pression azotée d'origine agricole doit être développée pour le prochain état des lieux en 2019. Cette méthode devra répondre à deux principaux enjeux. Le premier est de tenir compte des caractéristiques spécifiques du territoire et de l'hétérogénéité du milieu au sein même de celui-ci. Le deuxième est la prise en compte des multiples acteurs en lien avec cette problématique. Cela pour plusieurs raisons : d'abord parce qu'ils sont les futurs utilisateurs de la méthode, il est par conséquent nécessaire qu'ils se l'approprient, mais aussi parce qu'ils détiennent des données clés qui peuvent être intéressantes à intégrer à l'outil. Le travail doit, en ce sens, intégrer ces parties prenantes et considérer leurs intérêts à propos de notre sujet d'étude. Ces intérêts peuvent être complémentaires ou contradictoires. Par exemple, les producteurs canniens auront plutôt intérêt à ce que l'indicateur n'incrimine pas la culture de canne comme polluante. Ce qui pourrait, à l'inverse, accommoder les éleveurs qui ne seront pas accusés de sur-fertiliser les prairies. Leurs intérêts divergent donc en ce sens mais convergent vers le fait de ne pas vouloir l'inculpation de l'agriculture comme source exclusive de pollution azotée.

Dans ce contexte géographique et conceptuel, notre travail a pour objectif de :

**Construire un indicateur de la pression azotée d'origine agricole impactant la qualité des eaux de surface, à l'échelle de la masse d'eau, dans le contexte réunionnais et plus largement dans celui des DOM.**

Les questions de recherche abordées pour répondre à cet objectif seront :

- Quelle représentation permet de rendre compte du phénomène de pollution azotée dans le contexte réunionnais ?
- Quel indicateur permet de rendre compte de la pression azotée selon les objectifs relatifs à la mise en œuvre de l'état des lieux de la DCE et compte tenu des caractéristiques des données mobilisables dans le contexte réunionnais (qualité des données, échelles de mesure, volume de données, etc.) ?

Pour la construction d'indicateurs pertinents, le travail se situera dans le cadre d'une démarche participative et spatialisée pour les raisons suivantes :

- L'approche participative permet de répondre aux attentes des acteurs vis-à-vis de l'évaluation de cette pression tout en facilitant l'appropriation de la méthode par les futurs utilisateurs ;
- L'intégration des acteurs facilite l'accès aux données et l'intégration de leur différent point de vue dans les méthodes de construction de l'indicateur ;
- Une démarche partant des représentations des acteurs réunionnais spécialistes de domaines différents permet de prendre en compte le phénomène de pollution azotée dans sa globalité et de développer des indicateurs pertinents ;
- La spatialisation de l'indicateur via l'utilisation de l'outil SIG permet d'intégrer des données ayant des échelles différentes dans l'indicateur

Enfin, nous envisagerons pour conclure d'étudier les conditions d'applications aux autres DOM.

**Tableau 5 - Les étapes de la démarche méthodologique**

| <b>Démarche</b>                                                 | <b>Étapes</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Objectifs</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Identification des objectifs et des attentes</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Inventaire des objectifs environnementaux</li> <li>-Organisation de réunions participatives avec les acteurs pour valider les objectifs inventoriés et identifier leurs attentes vis-à-vis des indicateurs</li> <li>-Organisation d'une réunion de validation des objectifs avec l'ONEMA</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Identifier les objectifs à mesurer</li> <li>-Etablir un cahier des charges auquel doit répondre l'indicateur</li> <li>-Valider les objectifs et les pressions avec l'ONEMA</li> </ul>                                                                                                                   |
| <b>Description du phénomène et hiérarchisation des facteurs</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Représentation du processus de pollution à La Réunion</li> <li>-Organisation d'une réunion participative avec les acteurs pour valider la représentation du processus de pollution azotée à La Réunion et pour choisir les facteurs prioritaires à intégrer à l'indicateur</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Comprendre le phénomène à mesurer de la pression à la pollution dans le contexte spécifique de La Réunion</li> <li>-Etablir une liste de facteurs intervenant dans le phénomène et les hiérarchiser en fonction de l'importance de leur influence sur le processus de pollution à La Réunion</li> </ul> |
| <b>Sélection des variables et collecte de données</b>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Recherche de variables qui permettent de mesurer chaque facteur important</li> <li>-Confrontation des variables aux données disponibles</li> <li>-Sélection des variables et données à intégrer à l'indicateur</li> <li>-Collecte des données auprès des différents organismes</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Sélectionner les variables et les données les plus pertinentes et précises pour mesurer chaque facteur</li> <li>-Inventorier les données indisponibles aujourd'hui qui pourraient améliorer significativement l'indicateur dans le futur</li> </ul>                                                     |
| <b>Construction du modèle conceptuel d'indicateur</b>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Choix du cadre logique de l'indicateur s'appuyant sur l'analyse des indicateurs existants effectuée dans l'état de l'art</li> <li>-Enquêtes auprès des acteurs pour établir une répartition de l'azote minéral sur les différentes classes de cultures</li> </ul>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Construire un modèle conceptuel d'indicateur avec des scénarios de répartition à tester</li> </ul>                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Analyse des résultats</b>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Test des répartitions: comparaison d'une répartition de l'azote selon les dires d'acteurs à une répartition théorique</li> </ul>                                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Proposer une méthode d'évaluation selon différentes hypothèses</li> <li>-Analyser l'apport de la démarche participative</li> </ul>                                                                                                                                                                     |

Source personnelle

La démarche adoptée pour répondre à cette problématique et atteindre les objectifs fixée est résumée dans le Tableau 5. Nous avons d'abord cherché à identifier les objectifs et les attentes des acteurs vis-à-vis de l'indicateur puis le phénomène de pollution azotée a été décrit ce qui nous a permis de hiérarchiser les facteurs à considérer prioritairement dans l'indicateur. Enfin, la confrontation aux données disponibles nous a permis d'établir les variables à intégrer à l'indicateur. Nous avons finalement choisi un modèle conceptuel répondant aux attentes des acteurs afin de combiner ces variables et tenter de comparer les résultats obtenus à la bibliographie.

## **Partie 2**

### **Matériel et méthode**



# I - Identification des objectifs et attentes des acteurs

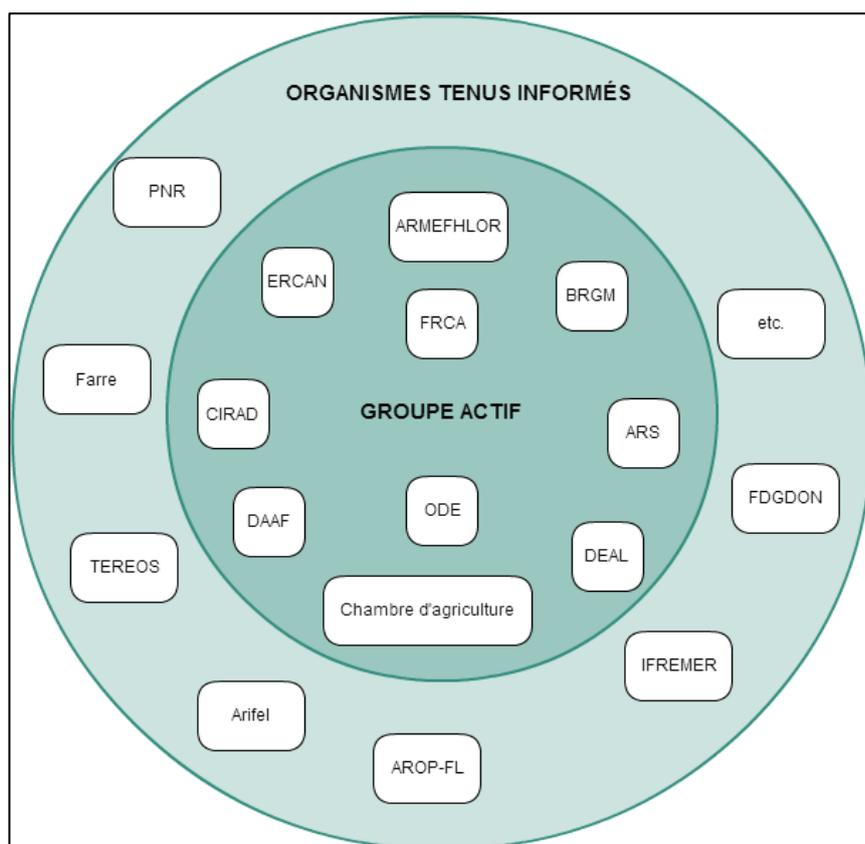
## 1. Identification des acteurs impliqués dans la démarche participative

L'identification des parties prenantes du projet a été réalisée en 2015. Parmi elles, citons d'abord les utilisateurs des futurs indicateurs : l'office de l'eau et la DEAL. L'Office de l'eau, créée en 2000, a le même rôle que les agences de l'eau en France métropolitaine : élaboration et mise en place du SDAGE, suivi de la qualité des eaux, prélèvement des redevances, gestion territoriale de l'eau potable et assainissement (Office de l'eau, 2016). La DEAL est le secrétariat du Comité de Bassin pour la révision du SDAGE. À La Réunion, elle a aussi été responsable de l'état des lieux exigé par la DCE en 2013 qu'elle a sous-traité à des bureaux d'études (Boussier, 2015).

D'autres organismes publics sont liés aux questions de la gestion de l'eau ou à celles des pressions agricoles. La DAAF (Direction de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt), service déconcentré de l'Etat, met en place à l'échelle locale les missions du ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (DAAF, 2016). La chambre d'agriculture dont les missions sont l'élaboration d'un plan régional de développement agricole et l'animation des territoires ruraux a un rôle important sur le sujet du développement de pratiques agricoles durables (Chambre d'Agriculture de La Réunion, 2016). Mais aussi la FDGDON (Fédérations Départementales des Groupements de Défense contre les Organismes Nuisibles), le parc naturel régional et l'ARS (Agence Régionale de Santé) sont aussi indirectement liés.

Des organismes de recherche agronomique sont aussi impliqués : le Cirad, bien sûr, mais aussi l'Armefflor (cultures fruitières, légumières et horticoles) et eRcane (canne à sucre). Le BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière) et l'Ifremer (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer), expert des ressources naturelles, sont aussi présents sur le territoire.

Figure 12 - Les acteurs impliqués dans le processus de développement des indicateurs



Les principaux groupements d'agriculteurs dans ce DOM sont le FRCA (Fédération Régionale des Coopératives Agricoles), l'AROP-FL (Association Réunionnaise des Organisations de Producteurs de Fruits et Légumes), l'Arifel (Association Réunionnaise Interprofessionnelle Fruits et Légumes) et Farre (Forum des agriculteurs responsables respectueux de l'environnement). Trois principales entreprises sont en relation avec l'agriculture : Tereos, unique transformateur de canne en sucre, alcool et amidon sur l'île ; Saphir, entreprise d'aménagement hydroagricole et COROI, spécialisée dans l'agrochimie.

L'ensemble des acteurs précédemment cités ont été

conviés à une première rencontre. C'est durant cette réunion qu'il a été décidé, de manière collective, du groupe d'acteurs qui continuerait à contribuer activement aux futurs travaux. Les autres sont seulement informés de l'avancement du projet. Finalement, dix organismes ont été activement impliqués au processus de décision. Ceux-ci sont schématisés dans la Figure 12.

Il s'agit de la DAAF, la DEAL, la chambre d'agriculture, l'Office de l'eau, le BRGM, l'ARS, l'Armefflor, le FRCA, eRcane et le Cirad.

Le Parc naturel régional, Farre, Tereos, l'Arifel, l'Arop-FL, l'Ifremer, la FDGDON et COROI composent le groupe d'informés de l'avancée des travaux.

Nous avons choisi de procéder par entretiens groupés afin de favoriser l'expression d'opinions parfois controversées et la discussion puisqu'en 2015, les enquêteurs ont souvent observé des difficultés face à des acteurs peu communicatifs. La démarche participative a été assurée par le biais de deux réunions d'acteurs « actifs » et d'un sondage auprès de l'ensemble des parties prenantes (« actifs » et « passifs »). Ces sollicitations sont résumées dans le Tableau 6. Les comptes rendus de réunions et le résultat du sondage sont en annexe (cf. annexe 8.4).

Les deux réunions se sont déroulées de la même façon. Une présentation était d'abord exposée aux acteurs pour les informer de l'avancé de la démarche et des objectifs de la réunion puis nous recueillons les avis des différents membres par une discussion ouverte. Les comptes rendus sont présentés en annexe 8.2 et 8.3. Les prises de décision pour la suite des travaux ont été prises en aval des réunions par nous-même en tenant compte de ces discussions et remarques exprimées par les acteurs et de la bibliographie.

**Tableau 6- Sollicitations des acteurs au cours de la démarche**

| Type de sollicitation | Date     | Durée    | Organismes participants                        | Objectifs                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------|----------|----------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Réunion</b>        | 09/05/16 | 3h       | ODE, DAAF, DEAL, CA, BRGM, eRcane, FRCA, CIRAD | -Restituer les résultats de 2015, informer des objectifs 2016 du projet PRESAGRIDOM<br>-Définir les acteurs participants activement aux travaux<br>-Identifier les objectifs et attentes des acteurs vis-à-vis des indicateurs                    |
| <b>Réunion</b>        | 06/06/16 | 3h       | ODE, DAAF, DEAL, CA, BRGM, eRcane, FRCA, CIRAD | -Identifier la représentation du phénomène de pollution azotée à La Réunion selon les acteurs<br>-Hiérarchiser les facteurs en fonction de leur importance dans le phénomène sur le territoire<br>-Compléter l'inventaire des données disponibles |
| <b>Sondage</b>        | 27/07/16 | 15 jours | CA, FRCA, BRGM, PNR, Tereos, CIRAD, eRcane     | -Choisir des hypothèses pour la construction du modèle conceptuel de l'indicateur<br>-Etablir une répartition des apports d'azote minéral et organique en fonction des classes de cultures selon dires d'acteurs                                  |

## 2. Identification des objectifs et attentes

Cette étape a pour but d'identifier les objectifs principaux d'évaluation, voire de réduction, de la pression azotée d'origine agricole. Un inventaire des objectifs a été effectué, à partir de la littérature. Ces objectifs ont plusieurs échelles : européenne, nationale ou départementale. Ils ont été présentés puis validés lors de la première réunion. Pour cela, les discussions ont été orientées sur les objectifs, selon eux, importants en matière de pollution azotée d'origine agricole après quoi ceux-ci ont été abandonnés, modifiés ou validés. C'est le niveau d'atteinte de ces derniers que l'on tentera de mesurer grâce à l'indicateur développé. Lors de cette première rencontre, la question des attentes des acteurs vis-à-vis de nos travaux a été posée. Cela nous a permis d'établir une liste de critères (cahier des charges) auxquels doit répondre l'indicateur. Enfin, les objectifs et les attentes ont été soumis à l'ONEMA pour validation finale le 1<sup>er</sup> juin 2016.

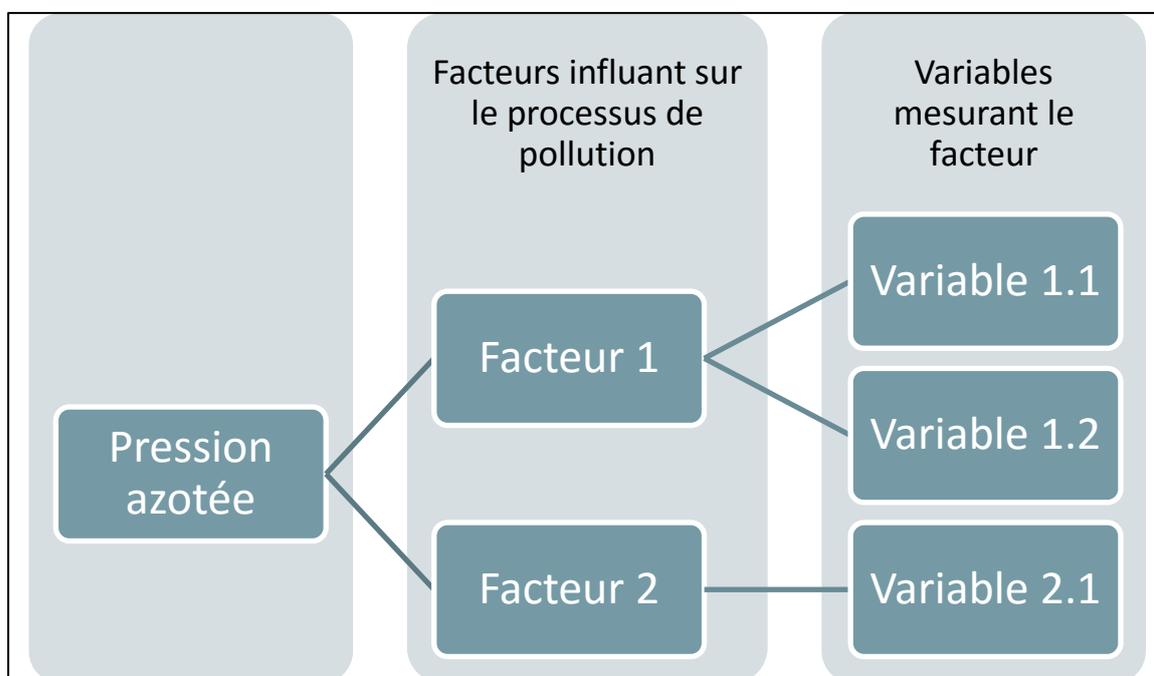
## II - Représentation collective du processus de pollution azotée à La Réunion : description du phénomène et hiérarchisation des facteurs

Cette étape a pour but de comprendre le processus de pollution azotée d'origine agricole dans le contexte spécifique de La Réunion. Pour cela, un schéma décomposant la pression et les facteurs influant ces impacts, a été construit à partir de la bibliographie. Celui-ci reflète le processus de pollution de manière globale, c'est-à-dire sans distinction vis-à-vis du contexte géographique. Lors de la seconde rencontre avec le groupe d'acteurs, ce schéma leur a été présenté afin qu'ils le commentent, le discutent et le modifient pour qu'il corresponde à leur représentation du phénomène dans la situation particulière de l'île de La Réunion. Des hypothèses ont été formulées sur l'importance de chaque facteur influant sur le processus de pollution. Ceux-ci ont ainsi pu être hiérarchisés selon leur importance sur ce territoire.

## III - Sélection de variables et collecte de données

Les variables permettant de mesurer chaque facteur composant la représentation du phénomène de pollution azotée à La Réunion élaborée précédemment avec les acteurs ont été répertoriées (Figure 13).

Figure 13 - Pression, dimensions et variables



Il a alors fallu confronter les variables que l'on veut mesurer aux données fiables et disponibles sur le territoire. Un travail d'inventaire des données accessibles a déjà été réalisé en 2015, durant la première phase du projet PRESAGRIDOM. Nous avons tout de même discuté à nouveau de la problématique de la disponibilité des données pour évaluer chaque dimension lors de la deuxième réunion avec les acteurs. Grâce à cette concertation, de nouveaux éléments ont pu être ajoutés à la liste dressée en 2015.

À l'issue de ce recensement de données, celles qui étaient les plus pertinentes en termes de précision et de fiabilité ont été sélectionnées pour mesurer chaque facteur. Celles-ci ont pu, *a posteriori*, être collectées auprès des différents acteurs pour la suite du travail.

## IV - Construction du modèle conceptuel d'indicateur

Le travail de comparaison des méthodes d'évaluation existantes, présenté dans l'état de l'art, a été confronté au cahier des charges établi lors de l'étape d'identification des attentes des acteurs. Un sondage nous a permis de recueillir l'avis des acteurs sur différentes hypothèses à intégrer ou non au modèle conceptuel. Nous avons ainsi pu définir le modèle d'indicateur le plus adéquat.

Les étapes de construction de l'indicateur ont été les suivantes :

1. identification des données à intégrer,
2. élaboration d'un bilan azoté simplifié selon le modèle « apports moins sorties »,
3. spatialisation,
4. et finalement agrégation à l'échelle de la masse d'eau.

Les besoins des cultures ont été estimés à partir de la bibliographie. Les données disponibles ne nous renseignant pas suffisamment sur les pratiques de fertilisation actuellement réalisées pour calculer précisément les entrées d'azote, nous avons dû établir des hypothèses de répartition de l'azote minéral importé sur l'île. Pour cela, le sondage adressé aux acteurs nous a permis de constituer une répartition selon les dires d'acteurs. Celle-ci a été confrontée à une répartition théorique établie à partir de la bibliographie.

On a réalisé une estimation des fuites d'azote en fonction de la lame d'eau et du bilan azoté par hectare. La spatialisation a été réalisée grâce au logiciel QGIS ® à l'échelle de la parcelle. Enfin, les résultats ont été agrégés à l'échelle de la masse d'eau par addition des fuites d'azote de chaque parcelle présente sur le bassin versant contribuant à la masse d'eau de surface.

Les résultats obtenus seront présentés de la manière suivante : nous commencerons par présenter les objectifs que doivent évaluer l'indicateur développé et les attentes des acteurs vis-à-vis de celui-ci. Puis nous élaborerons une représentation du processus de pollution azotée d'origine agricole à La Réunion partagée avec les acteurs. Enfin nous sélectionnerons les facteurs majeurs qui entrent en compte dans ce processus et les variables qui permettent de les mesurer compte tenu des données disponibles. Enfin, nous construirons un modèle conceptuel d'indicateur que nous testerons selon plusieurs hypothèses, l'une considérant l'opinion des acteurs et l'autre non.

# **Partie 3**

## **Résultats**



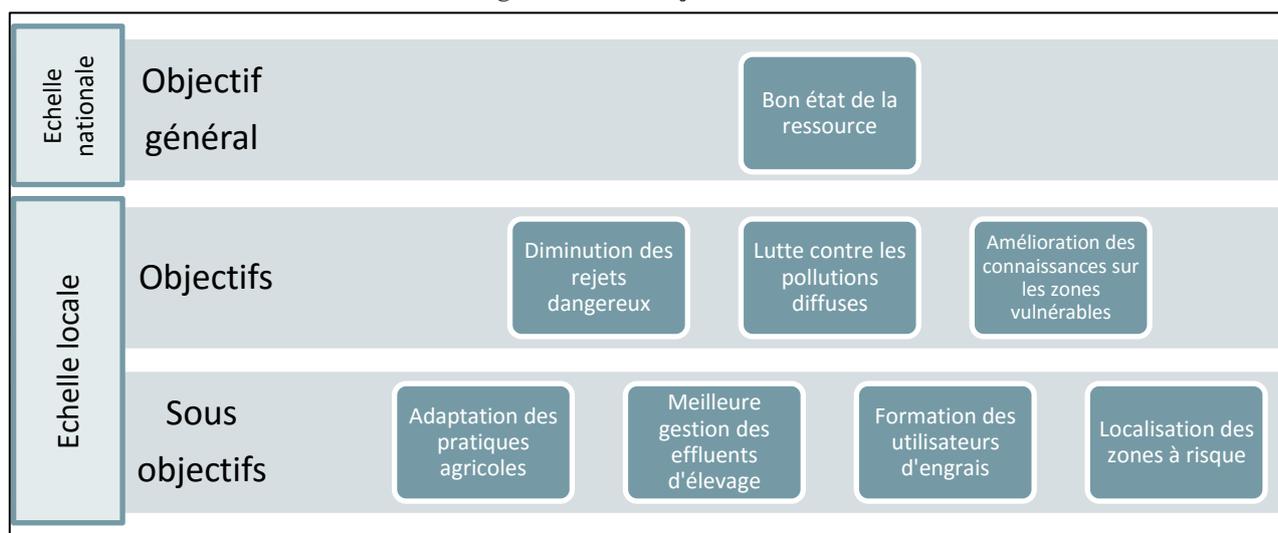
# I - Les objectifs environnementaux et les attentes des acteurs

## 1. Les objectifs

L'objectif global de DCE et de l'ONEMA est le bon état de la ressource en eau. Cependant, des objectifs plus spécifiques et contextualisés à chaque bassin hydrographique sont résumés dans les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE).

Après analyse de ce document et validation des objectifs avec les acteurs, il en ressort que les objectifs environnementaux en relation avec le secteur agricole à La Réunion sont de diminuer les rejets dangereux, de lutter contre les pollutions diffuses et d'améliorer les connaissances sur la vulnérabilité du milieu (Figure 14).

Figure 14 - Les objectifs à mesurer



Source personnelle

Pour cela, il est précisé que cette lutte contre les pollutions passe par sa réduction à la source. Cela via des pratiques agricoles adéquates, une meilleure gestion des effluents d'élevage et la formation des utilisateurs d'engrais. Le deuxième objectif insiste sur la nécessité de localiser les zones à risque dans le but de cibler les actions futures. Il convient donc d'apprécier les rejets de fertilisants azotés mais aussi la vulnérabilité du milieu.

## 2. Les attentes des acteurs

Durant les rencontres, les acteurs réunionnais ont évoqué plusieurs attentes concernant nos travaux. La (Figure 15) résume les critères auxquels doit répondre le futur indicateur :

Figure 15 - Critères auxquels doit répondre l'indicateur selon les acteurs

|                     |                                                   |
|---------------------|---------------------------------------------------|
| Facteurs à intégrer | Pratiques agricoles                               |
|                     | Milieu                                            |
|                     | Relations entre eau de surface et eau souterraine |
| Spatialisation      | Hiérarchisation des zones à risques               |
| Logistique          | Pas d'enquêtes                                    |

Source personnelle

L'indicateur doit prendre en compte le facteur « pratiques agricoles » mais pas seulement : il leur semble important de considérer aussi le milieu, c'est-à-dire les facteurs externes aux pratiques qui influencent les transferts de polluants.

Toujours selon ces acteurs, il est nécessaire d'intégrer les relations entre eau de surface et eau souterraine puisque des transferts ont lieu entre ces deux compartiments.

Ils souhaitent que l'indicateur spatialisé les zones à risques et les hiérarchise afin d'être en capacité de cibler les actions à mettre en place dans le futur.

Enfin, ils préféreraient que cet indicateur ne nécessite pas de données issues d'enquêtes car celles-ci seraient à renouveler tous les six ans ce qui entraîne la mise à disposition de moyens considérables.

Ainsi, on voit que la consultation des acteurs a un grand intérêt puisqu'elle nous a permis de compléter les objectifs de la DCE. À l'évaluation du bon état de la ressource, s'ajoutent des objectifs à visés opérationnels soient ciblés sur les pratiques et sur le milieu tout en considérant des contraintes de faisabilité.

## **II - La représentation partagée du processus de pollution à La Réunion**

### **1. Les facteurs impactant le processus de pollution azotée en général**

La (Figure 16) a été construite à partir de recherches bibliographiques. Il expose le processus généralisé de pollution de l'eau par les nitrates d'origine agricole.

#### ***A. Facteurs liés aux pratiques de fertilisation***

La quantité d'azote d'origine agricole que l'on retrouve dans l'eau est directement conditionnée par la quantité d'azote apportée et lixiviable. Celle-ci dépend de la quantité d'engrais apporté et de sa concentration en azote mais aussi de la part d'azote mobilisée par la culture. L'azote absorbé est lié aux besoins de la plante qui varient au cours du cycle cultural. Un fractionnement des apports pour répondre au mieux aux besoins limite la part d'azote lixiviable.

La rotation peut permettre de valoriser au mieux l'azote disponible dans le sol. Cela en alternant des cultures qui puiseront la ressource à des horizons différents ou qui ont des besoins en azote différents.

L'irrigation agit comme la pluie, c'est-à-dire que cet apport d'eau constitue une voie de transfert pour les nitrates. La couverture du sol influe sur le type de transfert : un sol nu favorisera d'avantage le ruissellement alors qu'un sol couvert le limitera. Le travail du sol a des conséquences sur sa structure et sur l'incorporation et la minéralisation de la matière organique dans le sol.

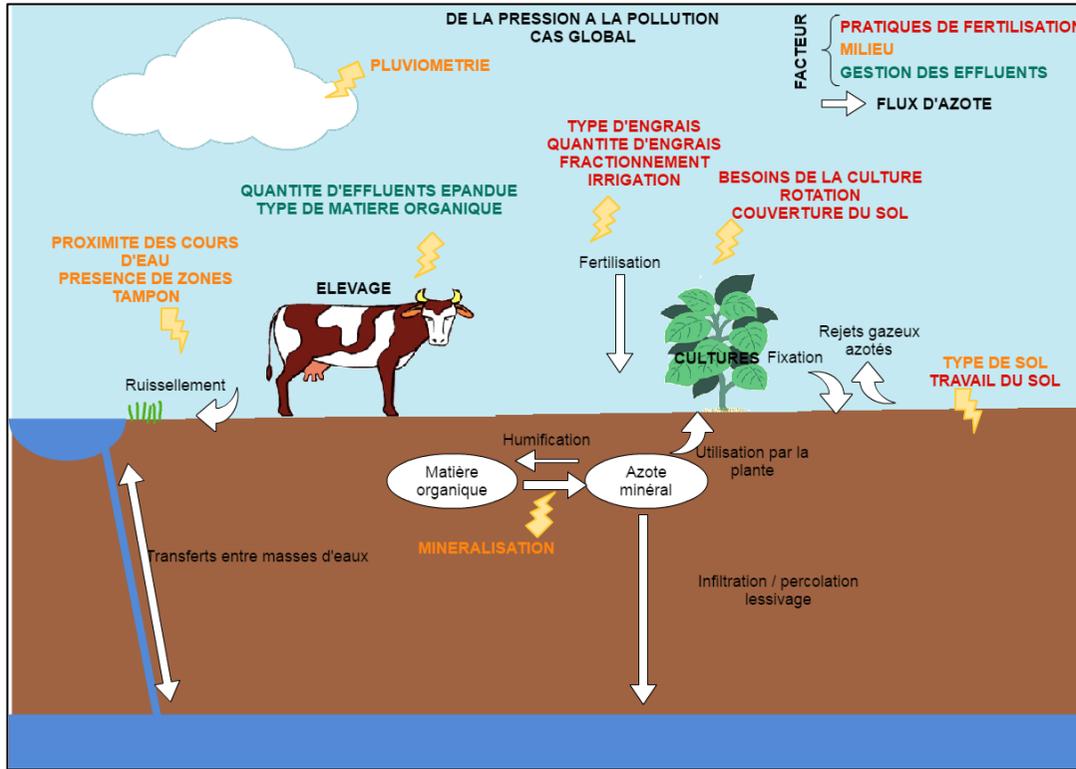
#### ***B. Facteurs liés à la gestion des effluents d'élevage***

Tout comme pour les engrais, la quantité de matières organiques épandues a des effets sur le processus de pollution. Le type de matière organique se répercute sur la quantité d'azote lixiviable puisqu'en fonction de la matière organique, le taux d'azote et le taux de minéralisation sont différents.

#### ***C. Facteurs liés au milieu***

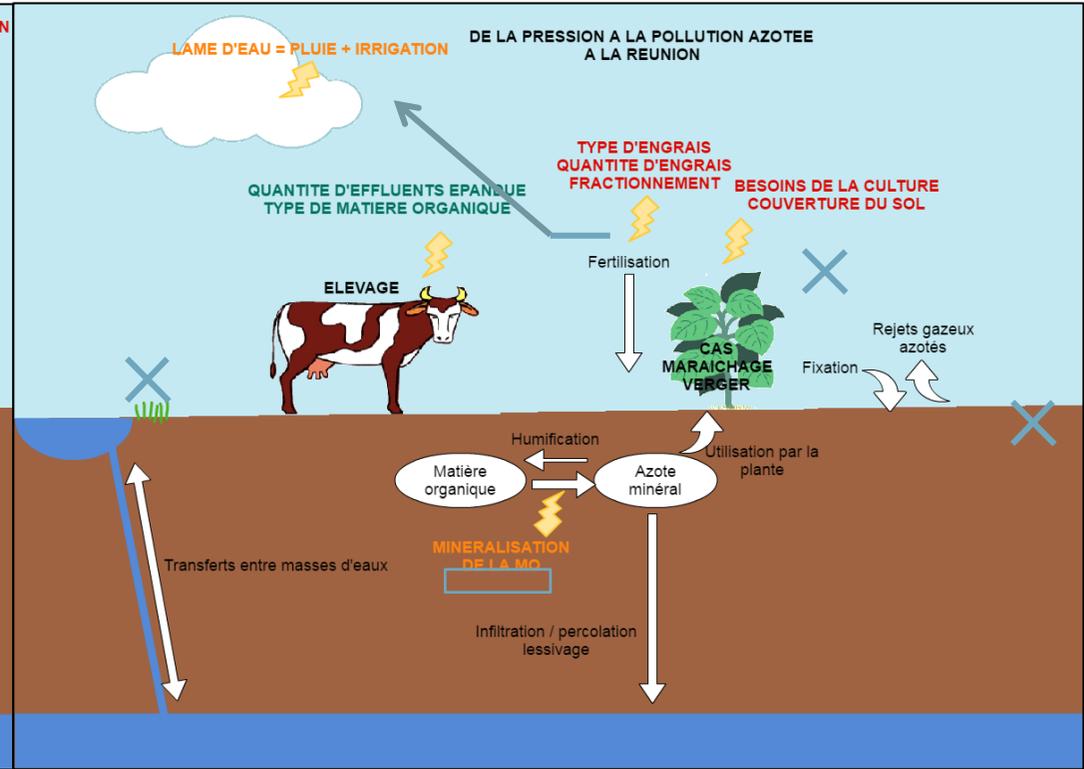
La pluviométrie impacte la quantité d'azote exportée de la parcelle. Le type de sol a des conséquences sur le type de transfert des eaux. En effet, selon le sol, la part d'eau infiltrée ou ruisselée n'est pas la même. Plus la parcelle sera proche d'un cours d'eau, plus l'azote ruisselé l'atteindra. Enfin, les végétaux fixes du paysage situés entre les parcelles et les cours d'eau, aussi considérées comme des zones dites 'tampons', ont la capacité d'absorber une partie de l'azote contenu dans les flux de surface à destination de la masse d'eau.

Figure 16 - L'azote, de la pression à la pollution en contexte généralisé



Source personnelle

Figure 17 - L'azote, de la pression à la pollution dans le contexte réunionnais



Source personnelle

## 2. Cas de La Réunion

Chaque facteur a été discuté avec les acteurs lors de la deuxième réunion afin de déterminer son importance dans le contexte réunionnais. Il en ressort les hypothèses suivantes (cf. Figure 16 et 17) :

Le facteur 'type de sol' a été considéré comme homogène à l'échelle de l'île. En effet, les sols de la SAU réunionnaises sont très majoritairement des sols andiques. Ce facteur est plutôt homogène dans notre cas d'étude. De plus, les sols andiques ont une forte capacité à infiltrer l'eau. Le facteur qui pourrait donc influencer sur la part d'eau ruisselée ou infiltrée serait la couverture du sol, autrement dit la culture en place sur la parcelle.

Le facteur minéralisation a été réduit au facteur « minéralisation en fonction du type de matière organique » puisque l'homogénéisation des types de sol a aussi pour conséquence une standardisation du taux de minéralisation du sol. Ce taux sera alors calculé uniquement en fonction du type matière organique apporté.

Les facteurs 'rotation' et 'travail du sol' n'entreront pas directement en compte dans le calcul de l'indicateur. Les cultures en place à La Réunion sont la canne, les prairies, les cultures maraichères et les vergers. Parmi elles, seules les cultures maraichères sont à cycle court. Les cultures pérennes occupent 74 % de la SAU de l'île. Ces facteurs ont donc peu de chance d'influer sur le processus de pollution azoté à l'échelle de la masse d'eau.

Les quantités d'azote apportées sont fonction de la concentration de l'engrais ou de matière organique, nous considérons donc ces facteurs 'type d'engrais' et 'type de matière organique'. La quantité d'azote, le fractionnement et les besoins de la culture conditionnent la quantité d'azote lessivable.

L'irrigation a le même effet que la pluviométrie. Ces deux facteurs peuvent être regroupés par addition de la quantité d'eau appliquée sous le terme 'lame d'eau'.

Enfin, nous avons choisi de négliger la part d'azote ruisselée. En effet, la part d'eau ruisselée sur andosol est très faible : de l'ordre de 5 à 7 % selon l'étude « *Effects of tillage and mulching on runoff under banana (Musa spp.) on a tropical Andosol* » (Cattan, et al., 2006). On suppose donc que l'azote dissout dans ces flux est infime. Par conséquent, les facteurs principalement liés au transport d'azote par ruissellement que sont 'proximité des cours d'eau' et 'présence de zones tampons' n'entreront pas dans le calcul de l'indicateur.

### Conclusion

Les principaux facteurs influant sur la pollution de l'eau par les nitrates d'origine agricole à La Réunion étant dorénavant identifiés, il convient maintenant de répondre à la question du choix des variables à mesurer pour rendre compte de chaque facteur.

## III - Sélection de variables et de données

La littérature nous a permis d'identifier les variables capables de mesurer chaque facteur. Nous les avons ensuite confrontées aux données disponibles afin de déterminer s'il était réellement possible de les intégrer à l'indicateur dans notre cas et de quelle manière (cf. Tableau 7).

### 1. Type d'engrais ou de matière organique

Le type de fertilisant peut être qualifié grâce aux indicateurs évaluant la dose d'azote libérée par type de matière. C'est-à-dire le nombre d'unités d'azote qui seront disponibles suite à un apport. Cela dépend de la concentration de l'engrais ou de la matière organique mais aussi, pour cette dernière, de sa vitesse de minéralisation. Pour évaluer ce facteur, les données disponibles dans notre cas d'étude sont celles de la douane : les importations sont enregistrées en tonnes. Pour certains types d'engrais la concentration est fournie, pour les autres il est à estimer. Nous disposons aussi de coefficients d'équivalence engrais qui ont été développés spécifiquement dans le contexte réunionnais pour chaque matière organique (cf. annexe 8.6).

## 2. Quantités d'engrais et de matière organique apportées et besoins de la culture

Plusieurs méthodes de mesure du surplus azoté ont été développées. Leur objectif est d'estimer l'azote lixiviable à l'échelle d'une parcelle ou d'une exploitation. Pour cela, on calcule la somme des entrées d'azote et on y soustrait la quantité d'azote exportée par les cultures. Les variables permettant d'apprécier les entrées d'engrais et de matière organique sont les doses moyennes apportées par surface et par culture. La quantité d'effluents apportée lors du pâturage peut être évaluée sur l'échelle temporelle annuelle en mesurant le nombre de jour au pâturage ou via la charge des prairies.

Pour estimer les quantités d'engrais apportées, nous détenons uniquement les données de douanes qui sont les quantités importées de chaque engrais à l'échelle de l'île. La carte d'occupation des sols de la DAAF nous permet de répartir ces quantités globales par culture puis par parcelle via des estimations à dire d'experts. Concernant les matières organiques, nous disposons des quantités produites de chaque matière organique par commune. Le plan d'épandage nous permettra de les répartir sur chaque parcelle. Aucune donnée ne nous est accessible sur le pâturage.

Les besoins annuels des cultures ont été estimés par la chambre d'agriculture en fonction du rendement espéré. Nous choisirons donc cette donnée pour chaque culture en prenant le rendement moyen de l'île.

**Tableau 7 - Facteurs, variables et données disponibles**

| Facteurs                            | Variables                                                                                                     | Données disponibles                                                                                                                    | Echelle temporelle / Echelle spatiale de la donnée                |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>Quantité d'engrais</b>           | Doses moyennes à l'hectare apportées pour chaque engrais par culture                                          | -Données de douane sur les importations d'engrais<br>-Carte de l'occupation du sol                                                     | -Annuelle / Région<br>-Annuelle / Parcelle                        |
| <b>Type d'engrais</b>               | Concentration en azote de chaque engrais                                                                      | -Données de douane sur les concentrations de certains engrais<br>-Estimation de la concentration en azote moyenne des engrais restants | -Annuelle / Région<br>-Constante / Région                         |
| <b>Fractionnement des apports</b>   | -Nombre d'apports<br>-N <sub>dispo</sub> hors période de besoin                                               | Aucune                                                                                                                                 | -                                                                 |
| <b>Besoins de la culture</b>        | Nombre d'unités d'azote nécessaire à chaque culture                                                           | Besoin annuel par culture                                                                                                              | -Constante / Région                                               |
| <b>Quantité d'effluents épandus</b> | Doses moyennes à l'hectare apportées pour chaque matière organique par culture                                | Gisement annuel de matières organiques par type et par commune                                                                         | -Décennal / Commune                                               |
| <b>Type de matière organique</b>    | -Concentration en azote et taux de minéralisation<br>-Journée de présence au pâturage<br>-Charge des prairies | Coefficient d'équivalence engrais                                                                                                      | -Constante / Région                                               |
| <b>Lame d'eau</b>                   | -mm de pluie<br>-mm d'eau apportés par l'irrigation<br>-Surfaces irriguées<br>-Intensité de drainage          | Mm de pluie annuelle<br>Périmètres d'irrigation<br>Quantité d'eau apportée sur chaque périmètre irrigué                                | -Constante / Région<br>-Constante / Région<br>-Constante / Région |

### 3. Fractionnement des apports

Pour évaluer le fractionnement des apports, on peut utiliser le nombre d'apport effectué sur un cycle cultural ou estimer l'efficacité du fractionnement en mesurant la proportion d'azote disponible hors période de besoin de la culture. Cependant, nous ne disposons d'aucune donnée nous permettant d'estimer ces variables. Il paraît donc impossible d'intégrer ce facteur à l'indicateur, nous sommes donc contraints de l'abandonner.

### 4. lame d'eau

La pluviométrie est communément mesurée grâce au millimètre de pluie tombée sur une période donnée. L'intensité de drainage est estimée par le nombre de ruisseaux d'ordre 1 sur la surface du bassin versant. Ce deuxième indicateur peut renseigner sur l'intensité de collecte des pluies puisque les cours d'eau d'ordre 1 sont ceux les plus en amont du bassin versant et leur nombre varie selon l'intensité des fortes pluies (Musy A., Higy C., Reynard E., 2014).

L'irrigation se mesure grâce aux quantités d'eau par jour appliquées sur la parcelle et au nombre de jours irrigués.

Les données dont nous disposons sont la pluviométrie moyenne annuelle, une carte des périmètres d'irrigation et les quantités totales d'eau apportée sur chaque périmètre par an. Nous pourrions estimer les millimètres d'eau irriguée en divisant ces quantités d'eau par la surface du périmètre.

#### *Conclusion*

Les facteurs, les variables et les données à intégrer au modèle sont maintenant établis. Les facteurs qu'il est finalement possible de considérer compte tenu des données disponibles sont la quantité d'engrais, le type d'engrais, les besoins des cultures, les quantités d'effluents épandus, le type de matière organique et la lame d'eau. Se pose alors la question de leur agrégation. Pour cela, il nous faut établir un cadre logique de construction.

## IV - Construction du modèle conceptuel de l'indicateur

### 1. Analyse des méthodes existantes

Le tableau en annexe 8.1 compare en détail les principales méthodes d'évaluation de la pression azotée d'origine agricole existantes.

#### *A. Objectif*

Notre objectif est d'évaluer les risques de pollution azotée, notamment de les hiérarchiser et de les spatialiser. Cinq méthodes existantes partagent cet objectif : DAE-G, Merlin, Territ'eau, Syst'N et NOPOLU.

#### *B. L'échelle*

Les échelles nous semblant les plus appropriées pour permettre une spatialisation sont la parcelle et le bassin versant. Les cinq indicateurs sont adaptés sur ce point.

#### *C. Les résultats*

Le fait de construire un modèle avec un résultat sous forme de quantité peut limiter l'aspect subjectif lié à l'attribution d'une note puisque celle-ci dépend essentiellement de celui ou ceux qui établissent les seuils. De plus, le passage de l'échelle parcelle à l'échelle de la masse d'eau peut se faire facilement par addition. Nous garderons donc cette caractéristique pour la construction de notre indicateur. Les outils qui proposent un résultat sous cette forme sont Syst'N et NOPOLU.

#### *D. Facteurs intégrés à l'indicateur et données d'entrée*

Parmi ces cinq outils, trois considèrent l'ensemble des facteurs que nous avons retenu : DAE-G, Merlin et Syst'N. Cependant, l'insuffisance de données disponibles à La Réunion ne nous permet de calculer aucun de ces indicateurs.

## Conclusion

Bien que Syst'N rassemblent tous nos critères, le manque de données d'entrée ne nous permet pas de choisir ce modèle tel quel. La liste de facteurs qu'il considère doit être réduite. De plus, la base de données de pertes en nitrate qui lui sert de référence est métropolitaine et nous sommes incapables de l'adapter au contexte réunionnais au vu des données disponibles. Par conséquent, il semble plus pertinent de construire un nouvel indicateur en nous inspirant de cette méthode et en la simplifiant.

## 2. Construction d'un modèle conceptuel « sur mesure »

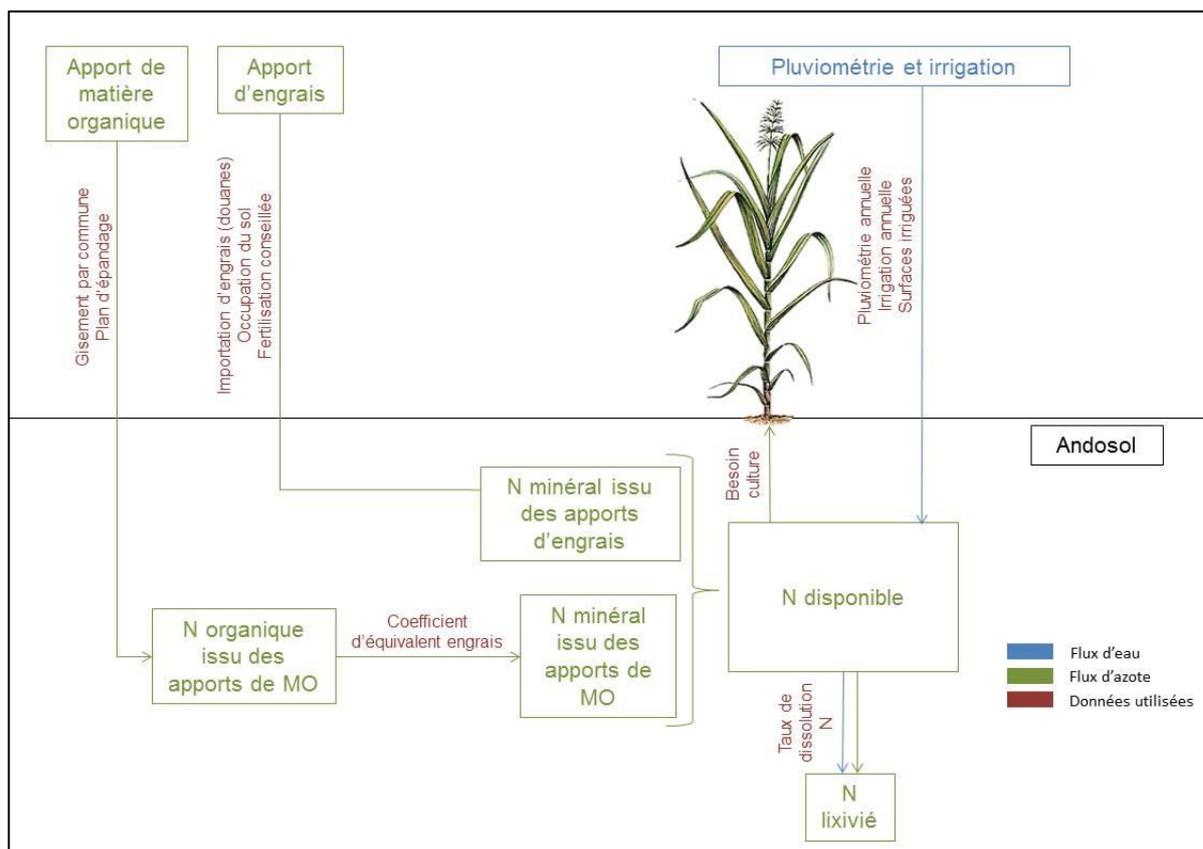


Figure 18- Schéma du modèle conceptuel de l'indicateur

On cherche à construire un modèle à partir des facteurs et des données disponibles permettant d'estimer l'azote lixivié (cf. Figure 18). On doit tout d'abord estimer l'azote d'origine agricole disponible dans le sol. Pour cela, on utilise, comme dans la majorité des indicateurs existants, la variable balance azotée. La valeur des entrées d'azote peut être approchée en utilisant les données d'importation converties en unités d'azote et répartie sur la SAU en fonction de la culture. Les coefficients de cette répartition ont été établis de deux manières : à partir du sondage réalisé auprès des acteurs et à partir des besoins des cultures tirés de la bibliographie. Les données de production de matière organique par commune peuvent être réparties sur les surfaces de la commune en question. Pour cela, on utilisera des coefficients de répartition par classe de culture établis via le sondage transmis aux acteurs. Ces résultats seront convertis en unité d'azote grâce à un coefficient d'équivalence engrais. La somme des quantités d'azote minéral et organique donne les entrées, autrement dit, l'azote disponible.

Les besoins théoriques de la culture seront soustraits à cet azote disponible.

La lame d'eau va emporter une partie de l'azote restant au cours d'eau par infiltration. Grâce aux données de pluviométrie et d'irrigation annuelle rapportée à la parcelle, on mesure cette lame d'eau. Un coefficient de dissolution de l'azote disponible permettra de mesurer approximativement l'azote lixivié en fonction de la quantité d'eau infiltrée.

L'utilisation de l'outil SIG pourra spatialiser ces estimations sur chaque parcelle. L'ensemble des résultats obtenus pour les parcelles situées sur la surface de contribution de la masse d'eau sera ensuite additionné pour obtenir un résultat par masse d'eau.

### 3. Estimation et spatialisation de la balance azotée à l'échelle de la parcelle

Pour calculer la balance azotée par parcelle, les données utilisées sont :

1. l'estimation des besoins des cultures,
2. les gisements de matière organique par commune,
3. les coefficients d'équivalence engrais fournis par la chambre d'agriculture,
4. les données d'importation d'engrais de la douane,
5. la carte d'occupation des sols de la DAAF. La carte d'occupation des sols ne donne pas toujours avec précision la culture en place sur chaque parcelle mais l'on distingue quatre classes de cultures : canne, prairie, maraîchage et verger. Nos travaux se basent donc sur ces classes.

#### A. Calcul des besoins des cultures

Le calcul des besoins utilise l'estimation des besoins par culture fournie par la chambre d'agriculture. Ces données nous donnent pour chaque culture, à un rendement donné, un besoin estimé en kg d'azote par hectare. Nous avons choisi le besoin correspondant au rendement moyen des cultures sur l'île. Pour les classes de cultures « maraîchage » et « verger », nous avons calculé la moyenne des besoins des cultures entrant dans la classe pondérée par la surface totale de la culture sur l'île.

Soit  $c$  une classe de culture,

Soit  $x$  une culture,

Soit  $n$  le nombre de cultures comprises dans la classe,

$$\text{Besoin}(c) = \frac{\sum_i^n \text{Besoin}(x_i) \times \text{Surface}(x_i)}{\sum_i^n \text{Surface}(x_i)}$$

Les besoins de la classe « maraîchage » ont été multipliés par trois afin de considérer une succession de trois cycles culturaux par an. Enfin, la restitution d'azote liée au pâturage évaluée à 150 kg N/ha pour un chargement de 3 UGB, a été soustraite des besoins de la classe « prairie » ceci en accord avec le référentiel technico-économique bovin lait de La Réunion indiquant des charges en bétail de 2 à 4 UGB/ha (Chambre d'Agriculture de La Réunion, 2014).

Les résultats des calculs de besoins moyens par classe de culture et par an sont synthétisés dans le Tableau 8, le détail des calculs se trouve en annexe 8.5. La canne est la classe de culture nécessitant le moins d'azote par hectare et par an. On obtient un besoin plus faible pour les vergers que pour les prairies. Cela s'explique par la présence de cultures en verger peu consommatrices d'azote comme le litchi ou le manguier. Enfin, selon ces calculs, c'est le maraîchage qui est le plus demandeur d'engrais azoté.

**Tableau 8 - Résultat de l'estimation des besoins annuels par classe de culture**

| Moyennes          | Besoin (kg N/ha/an) |
|-------------------|---------------------|
| <b>Canne</b>      | 96                  |
| <b>Prairie</b>    | 150                 |
| <b>Maraîchage</b> | 196                 |
| <b>Verger</b>     | 132                 |

## B. Calcul des apports en azote minéral par parcelle

Le détail des calculs de cette partie sont en annexe 8.6.

### a] Calcul des quantités d'azote importées

Le fichier de données fourni par la douane comportait les importations par catégorie de produit en tonnes et parfois converties en unités d'azote (cf. Tableau 9).

Les catégories de produits où il était spécifié que la teneur en azote était inférieure ou égale à 10 % ont été converties en unités d'azote sur la base d'une concentration de 10 %. Selon Saint-Macary (2002), les importations d'azote minéral à La Réunion étaient de l'ordre de 6000 tonnes par an en 2002 (Saint Macary, et al., 2002). Pour convertir les catégories de produits restantes, nous nous sommes basés sur cette donnée globale afin de fixer une concentration azotée moyenne des catégories restantes. La concentration des catégories restantes est fixée à 40 %. Ainsi, on obtient des importations variant de 4 189 t en 2013 à 5 812 t d'azote en 2014.

**Tableau 9 - Extrait du fichier de données fourni par la douane sur les importations d'engrais en 2015**

| NC8      | LibNC8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | VAL IMP<br>2015 | QTE IMP<br>2015 | US IMP<br>2015 | Lib<br>US |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------|
| 31021010 | Urée, même en solution aqueuse, d'une teneur en azote > 45 % en poids du produit anhydre à l'état sec (à l'excl. des produits présentés soit en tablettes ou formes simil., soit en emballages d'un poids brut <= 10 kg)                                                                                                                | 3 509 614       | 7 649 832       | 3 329 893      | Kg n      |
| 31052090 | Engrais minéraux ou chimiques contenant de l'azote, du phosphore et du potassium, d'une teneur en azote <= 10 % en poids du produit anhydre à l'état sec (à l'excl. des produits présentés soit en tablettes ou formes simil., soit en emballages d'un poids brut <= 10 kg)                                                             | 4 130 517       | 8 217 655       |                |           |
| 31055100 | Engrais minéraux ou chimiques contenant des nitrates et des phosphates (à l'excl. du dihydrogénorthophosphate d'ammonium [phosphate monoammonique], de l'hydrogénorthophosphate de diammonium [phosphate diammonique] ainsi que des produits présentés soit en tablettes ou formes simil., soit en emballages d'un poids brut <= 10 kg) | 285 020         | 426 199         |                |           |

Source : Douane, 2015

### b] Répartition par parcelle

Les quantités d'azote importées ont alors été réparties par catégorie de culture de deux manières : selon les résultats d'un sondage complété par les acteurs locaux (scénario **RA**) et selon les besoins des cultures concernées (scénario **RB**). Ces deux répartitions nous permettront de comparer les résultats obtenus avec ou sans l'intégration des acteurs au processus de construction de l'indicateur.

Scénario RA : pour la répartition selon les acteurs, un sondage a été envoyé à l'ensemble des membres actifs et passifs participants à l'étude, c'est-à-dire, à la DAAF, la DEAL, la chambre d'agriculture, l'Office de l'eau, le BRGM, l'ARS, l'Armeflor, le FRCA, eRcane, le Cirad, le Parc naturel régional, Farre, Tereos, l'Arifel, l'Arop-FL, l'Ifremer, la FDGDON et COROI. Le sondage contenait la question suivante : « comment estimez-vous la répartition des apports d'engrais importés à La Réunion par catégorie de cultures (en pourcentage de la SAU totale toutes cultures confondues) ? ».

Au total, six réponses nous sont parvenues sur la question du sondage relative à la répartition de l'azote par classe de culture. Les répondants représentent les structures suivantes : Chambre d'agriculture (2 répondants), Tereos (1), Parc naturel régional (1), Cirad (2). A partir de ces taux de répartition, les quantités d'azote importées ont pu être converties en dose annuelle apportée à l'hectare selon la formule suivante :

Soit  $c$  une classe de culture,

Soit  $TRA$  un taux de répartition défini selon les acteurs

Soit  $QN_{minéral}$  la quantité d'azote minéral importée annuellement à l'échelle de l'île,

$$Dose N_{minéral} A(c) = \frac{TRA(c) \times QN_{minéral}}{Surface(c)}$$

Scénario RB : la deuxième répartition reprend les besoins calculés précédemment. Ces derniers ont été pondérés par la SAU de chaque classe de culture puis convertis en pourcentage en utilisant la formule suivante :

Soit  $TRB$  le taux de répartition défini selon les besoins des cultures

Soit  $c$  une classe de culture,

Soit  $n$  le nombre total de classes de cultures,

$$TRB(c) = \frac{Besoin(c) \times Surface(c)}{\sum_i^n Besoin(c_i) \times Surface(c_i)}$$

Soit  $QN_{minéral}$  la quantité d'azote minéral importée annuellement à l'échelle de l'île,

$$Dose N_{minéral}B(c) = \frac{TRB(c) \times QN_{minéral}}{Surface(c)}$$

On comptabilise un besoin total pour la SAU de l'île de 5 435 t d'azote ce qui est inférieur aux importations de 2015 estimées à 5 812 t.

**Tableau 10 - Résultat de la répartition de l'azote minéral par classe de culture selon les acteurs (A) et selon les besoins (B)**

| Classe de culture | Taux de répartition de l'azote minéral selon les acteurs (A) (%) | Répartition de l'azote minéral selon les acteurs (A) (kg/ha) | Taux de répartition de l'azote minéral selon les besoins (B) (%) | Répartition de l'azote minéral selon les besoins (B) (kg/ha) |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Canne</b>      | 68,9                                                             | 162                                                          | 43,7 %                                                           | 103                                                          |
| <b>Prairie</b>    | 10,2                                                             | 144                                                          | 11,41 %                                                          | 160                                                          |
| <b>Maraîchage</b> | 16,1                                                             | 86                                                           | 39,29 %                                                          | 210                                                          |
| <b>Verger</b>     | 4,8                                                              | 121                                                          | 5,60 %                                                           | 141                                                          |

Si l'on compare ces deux répartitions (Tableau 10), on observe que les apports sur maraîchage sont très faibles dans la première répartition alors que ce sont les cultures ayant les plus grands besoins. Les apports sur canne sont, quant à eux, élevés. Dans la deuxième, les apports sur canne sont diminués au profit des apports sur maraîchage, et plus faiblement des apports sur prairie et verger.

### C. Calcul des apports en azote organique par parcelle

Les données de production de matières organiques par commune en tonnes ont été converties en unités d'azote par multiplication au coefficient d'équivalence engrais de chaque matière. Les résultats ont été additionnés pour obtenir une production d'unité d'azote par commune.

Soit  $j$  la commune,

Soit  $i$  le type de matière organique et  $n$  le nombre total de types de matière organique,

Soit  $QN_{organique}(j)$  la quantité d'azote organique produite dans la commune  $j$ ,

Soit  $QMO_i(j)$  la quantité de matière organique  $i$ ,

Soit  $CEE_i$  le coefficient d'équivalence engrais de la matière organique  $i$ ,

$$QN_{organique}(j) = \sum_i^n QMO_i(j) \times CEE_i$$

Les matières organiques étant peu transportables, nous avons supposé que les matières organiques produites sur la commune sont épandues sur la même zone.

Tout comme pour l'azote minéral, un sondage a été transmis aux acteurs afin de définir des taux de répartition de l'azote provenant des matières organiques sur les différentes classes de culture. La question était la suivante : « comment estimez-vous la répartition des épandages de la matière organique d'origine agricole produite à La Réunion par catégorie de cultures ? ». Les taux de répartition ont été ajustés de

façon proportionnelle pour les communes où l'une des classes n'était pas présente selon la formule suivante :

Soit c une classe de culture et n le nombre de classes de culture présentes sur la commune,

Soit TRN organique corrigé le taux de répartition de l'azote organique corrigé,

Soit TRN organique (c) le taux de répartition de l'azote organique de la classe de culture c

$$TRN_{organique\ corrigé} = \frac{TRN_{organique}(c)}{\sum_i^n TR_{organique\ i}}$$

La question du sondage relative aux taux de répartition de l'azote organique a obtenu six réponses provenant des mêmes acteurs que pour la répartition de l'azote minéral. Elles nous ont permis d'établir les taux exposés dans le Tableau 11.

**Tableau 11 - Taux de répartition de l'azote organique par classe de culture selon les acteurs**

| Classe de culture | Taux de répartition de l'azote organique | Taux de répartition de l'azote organique (communes sans canne) | Taux de répartition de l'azote organique (communes sans prairies) |
|-------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>Canne</b>      | 44,00 %                                  | 0                                                              | 71,66 %                                                           |
| <b>Prairie</b>    | 38,60 %                                  | 68,93 %                                                        | 0                                                                 |
| <b>Maraîchage</b> | 13,40 %                                  | 23,93 %                                                        | 21,82 %                                                           |
| <b>Verger</b>     | 4,00 %                                   | 7,14 %                                                         | 6,51 %                                                            |

Les quantités d'azote organique par commune ont été réparties selon ces taux par classe de culture. Le résultat a ensuite été rapporté à la surface de la classe de culture de la commune. Le Tableau 12 donne la répartition de l'azote organique par classe de cultures et par commune en kg N/ha.

**Tableau 12 - Résultat de la répartition de l'azote organique par classe de culture et par commune en kg N/ha**

| Commune                        | Canne (kg N/ha) | Prairie (kg N/ha) | Maraîchage (kg N/ha) | Verger (kg N/ha) | Ensemble des cultures (kg N/ha) |
|--------------------------------|-----------------|-------------------|----------------------|------------------|---------------------------------|
| <b>LES AVIRONS</b>             | 26              | 34                | 14                   | 11               | 23,9                            |
| <b>BRAS-PANON</b>              | 1               | 25                | 18                   | 5                | 2,3                             |
| <b>ENTRE-DEUX</b>              | 31              | 48                | 5                    | 5                | 17,8                            |
| <b>L'ÉTANG-SALE</b>            | 5               | 21                | 4                    | 2                | 6,5                             |
| <b>PETITE-ÎLE</b>              | 2               | 23                | 3                    | 2                | 3,4                             |
| <b>LA PLAINE-DES-PALMISTES</b> | 0               | 10                | 90                   | 62               | 13,8                            |
| <b>LE PORT</b>                 | 0               | 98                | 5                    | 2                | 10,5                            |
| <b>LA POSSESSION</b>           | 21              | 21                | 9                    | 9                | 17,3                            |
| <b>SAINT-ANDRE</b>             | 2               | 57                | 11                   | 7                | 4,2                             |
| <b>SAINT-BENOIT</b>            | 1               | 16                | 7                    | 1                | 2,3                             |
| <b>SAINT-DENIS</b>             | 29              | 72                | 5                    | 12               | 20,5                            |
| <b>SAINT-JOSEPH</b>            | 9               | 26                | 11                   | 8                | 12,1                            |
| <b>SAINT-LEU</b>               | 6               | 4                 | 12                   | 16               | 5,5                             |
| <b>SAINT-LOUIS</b>             | 6               | 35                | 13                   | 8                | 9,8                             |
| <b>SAINT-PAUL</b>              | 8               | 10                | 9                    | 5                | 8,5                             |
| <b>SAINT-PIERRE</b>            | 3               | 22                | 8                    | 3                | 5,0                             |
| <b>SAINT-PHILIPPE</b>          | 0               | 16                | 1                    | 0                | 0,4                             |
| <b>SAINTE-MARIE</b>            | 1               | 5                 | 6                    | 4                | 1,9                             |
| <b>SAINTE-ROSE</b>             | 0,4             | 0                 | 2                    | 0,3              | 0,5                             |
| <b>SAINTE-SUZANNE</b>          | 1               | 7                 | 2                    | 2                | 1,1                             |
| <b>SALAZIE</b>                 | 154             | 359               | 10                   | 13               | 49,3                            |
| <b>LE TAMPON</b>               | 43              | 7                 | 15                   | 45               | 13,8                            |
| <b>LES TROIS-BASSINS</b>       | 38              | 8                 | 80                   | 602              | 15,6                            |
| <b>CILAOS</b>                  | 0               | 307               | 6                    | 17               | 20,6                            |

Cette répartition pose problème pour certaines communes puisque l'on observe parfois des résultats aberrants : à Salazie, les surfaces en canne et en prairie sont très faibles ce qui induit des résultats très élevés. On obtient ainsi 154 kg N/ha d'azote organique appliqué sur la canne et 354 kg N/ha sur prairie. On retrouve ce problème aux Trois-Bassins où la surface en verger est faible et, par conséquent, atteint 602 kg N/ha et à Cilaos où le résultat pour la prairie est de 307 kg N/ha.

Cette répartition paraissant peu pertinente, nous choisissons de répartir simplement la quantité d'azote organique épanchée par commune.

Soit  $j$  une commune,

Soit  $QN_{organique}(j)$  la quantité d'azote organique produite dans la commune  $j$ ,

Soit  $Dose\ N_{organique}(j)$  la dose annuelle d'azote organique appliquée sur les parcelles de la commune  $j$ ,

$$Dose\ N_{organique}(j) = \frac{QN_{organique}(j)}{Surface(j)}$$

On suppose toujours que l'azote organique produit sur une commune est épanché sur cette même commune. Cette fois-ci nous formulons la deuxième hypothèse qui est que les doses appliquées sont les mêmes pour toutes les classes de culture d'une commune. Ces doses sont présentées dans la dernière colonne du Tableau 12.

#### D. Balance azotée

La balance azotée a été calculée à l'hectare et à l'échelle de la parcelle de la manière suivante :

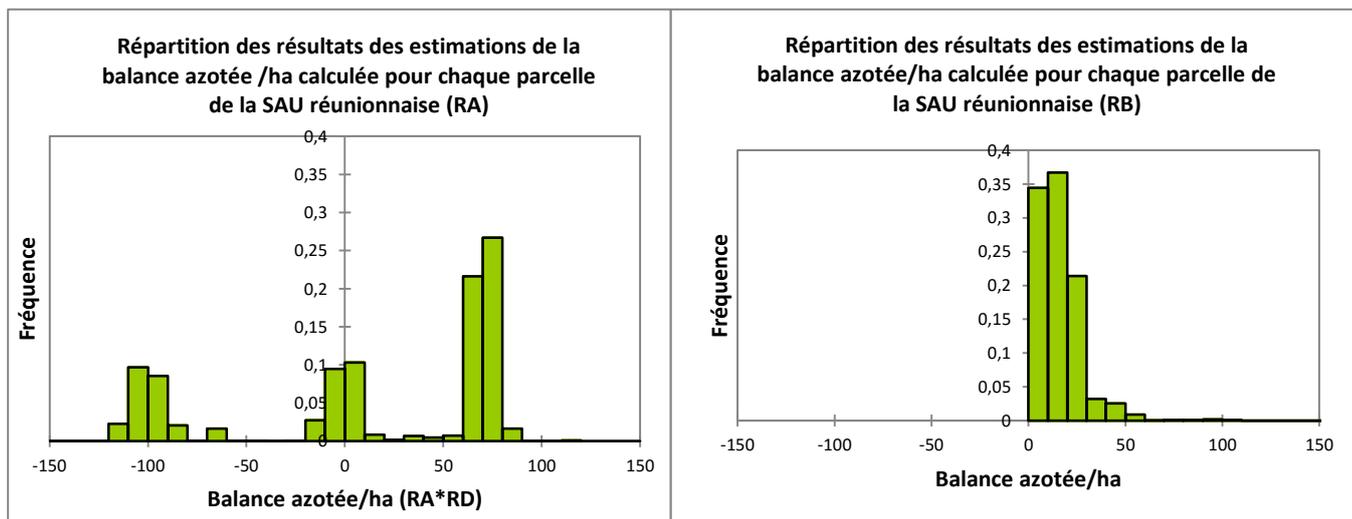
Soit  $p$  une parcelle,

Soit  $Balance\ N(p)$  la balance azotée à l'hectare de la parcelle  $p$ ,

$$Balance\ N(p) = Dose\ N_{minéral}(c) + Dose\ N_{organique}(j) - Besoin(c)$$

Ce calcul a été effectué selon les deux répartitions de l'azote minéral (scénarios RA et RB). La Figure 19 présente la répartition des résultats obtenus. A gauche, les résultats obtenus à partir de la répartition selon les acteurs (scénario RA) varient de -110 kg N/ha à 115 kg N/ha avec des fréquences plus importantes aux alentours de -100, 0 et 75 kg N/ha.

Figure 19 - Histogramme de la répartition des résultats de balance azotée/ha calculées pour RA et pour RB

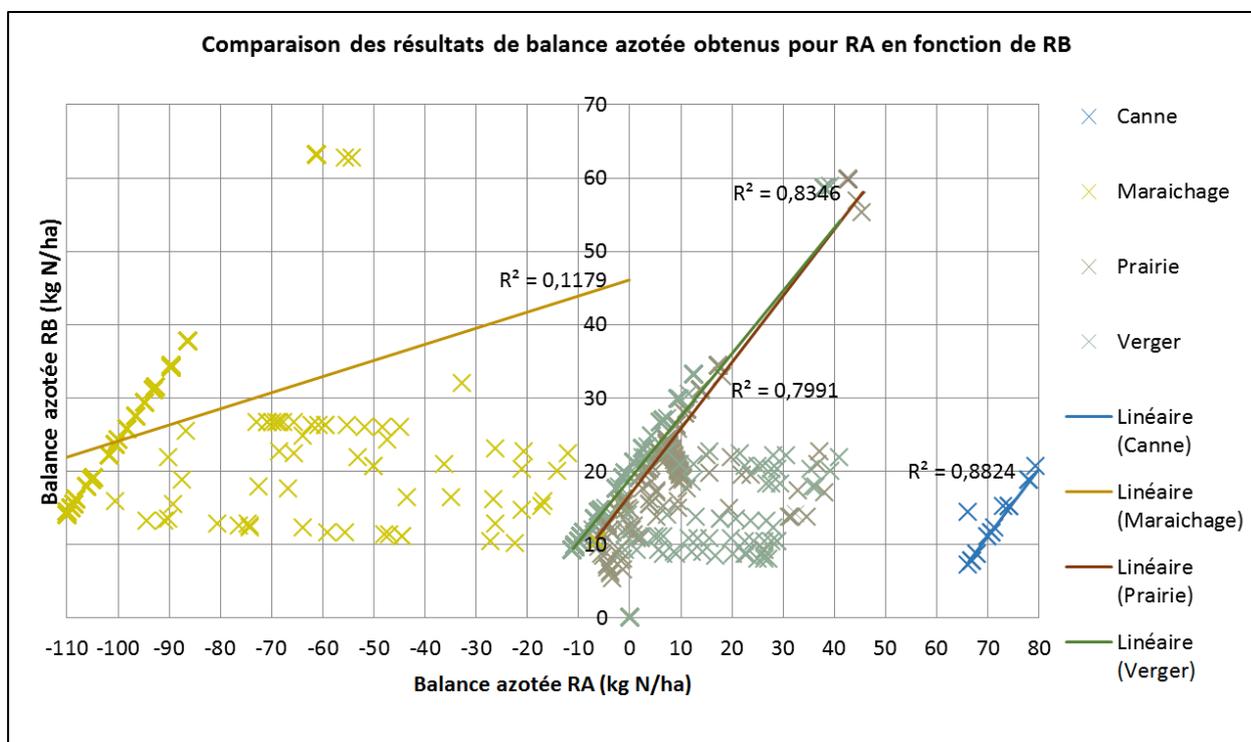


La répartition B donne uniquement des résultats positifs. Cela est dû au fait que la quantité d'azote minéral importée dépasse les besoins des cultures. Ces résultats ont une étendue plus faible : ils varient de 0 à 63 kg N/ha avec une fréquence plus élevée entre 0 et 25 kg N/ha.

La Figure 20 représente les résultats de la balance azotée selon RB en fonction de RA. Les points en jaune reflètent la balance azotée des cultures maraichères. Ces dernières obtiennent des résultats très

variables mais globalement les plus faibles lorsqu'on calcule la balance selon RA alors qu'ils sont peu étendus et moyens à élevés selon RB. Les points bruns et verts reflètent prairies et vergers. Pour ces classes de cultures, les résultats selon les deux répartitions sont proches bien que RB surestime un peu leurs valeurs par rapport à RA. Enfin les points bleus représentent les résultats sur la canne. Cette dernière obtient les balances azotées les plus élevées selon RA et les plus faibles selon RB.

Figure 20 - Comparaison des résultats de balance azotée pour RA et pour RB



### E. Spatialisation de la balance azotée à l'hectare à l'échelle de la parcelle

La spatialisation des résultats reflète très bien les commentaires précédents. La Figure 21 spatialise la balance azotée selon la répartition A alors que la Figure 22 représente la balance azotée selon la répartition B. Les fonds de carte représentent les masses d'eau superficielles définies à La Réunion. La culture de la canne, plus présente sur le littoral semble sur-fertilisée sur la Figure 21 alors que les prairies, plus présentes dans les hauts de l'île ont majoritairement une balance azotée équilibrée. Les surfaces en verger et en maraîchage sont trop faibles pour être clairement identifiées sur la carte. Sur la Figure 22, la hiérarchie des balances azotées semblent inversée. On trouve une balance azotée plus élevée en altitude où les prairies dominent et un résultat équilibré à faiblement positif sur les surfaces où est cultivée la canne.

Figure 21 - Carte de la balance azotée à l'hectare calculée à la parcelle selon RA

CARTE DE LA BALANCE AZOTEE PAR HECTARE CALCULEE A LA PARCELLE SELON LA REPARTION RA

Légende

Balance azotée par parcelle (kg N/ha)

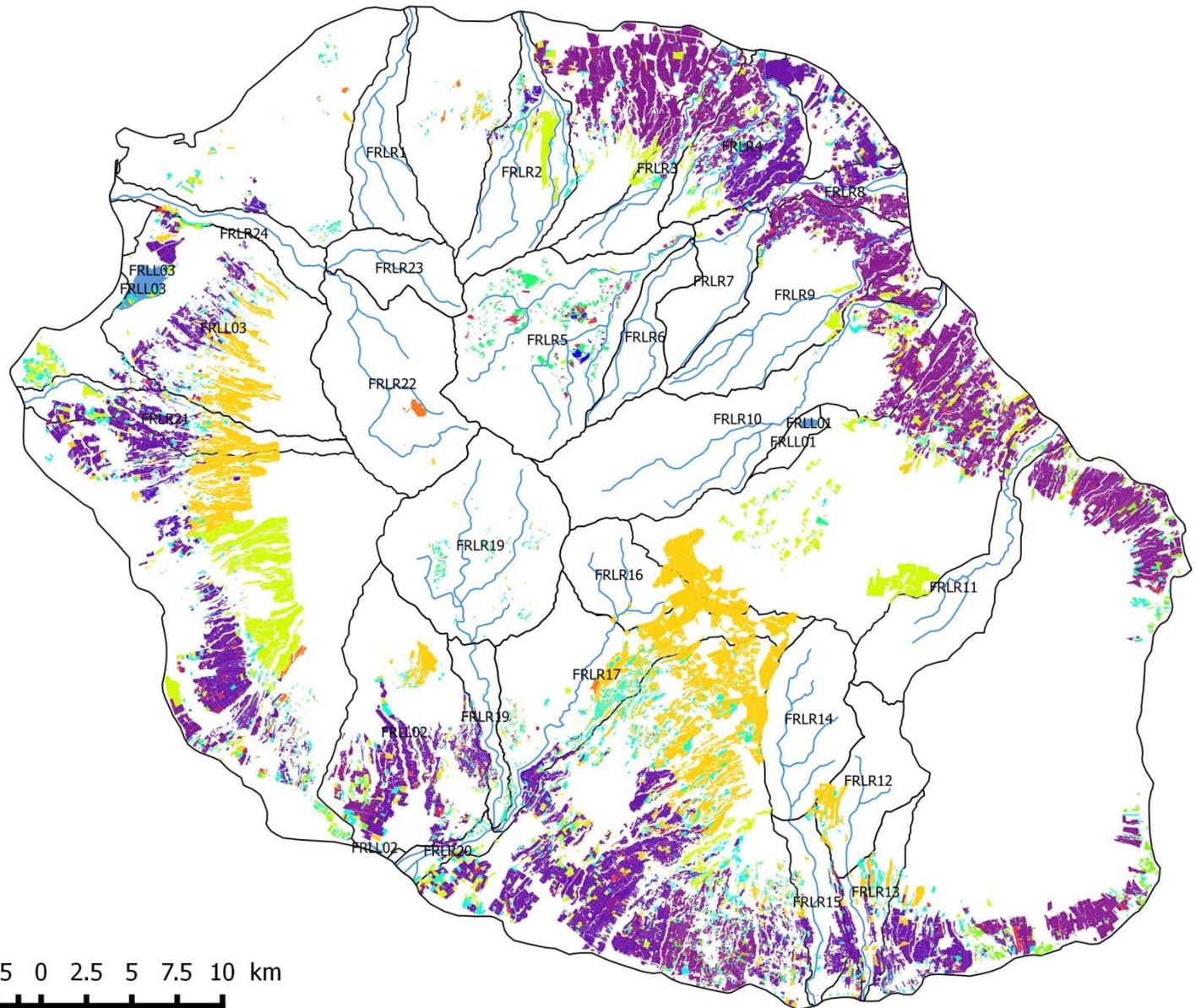
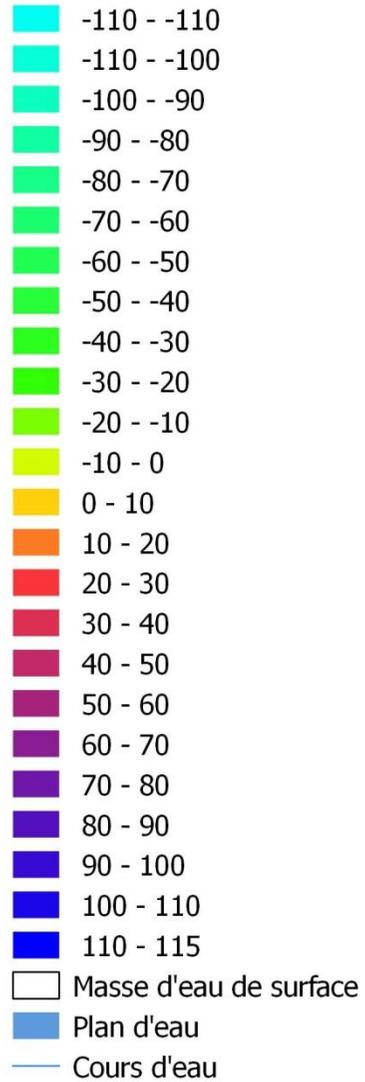
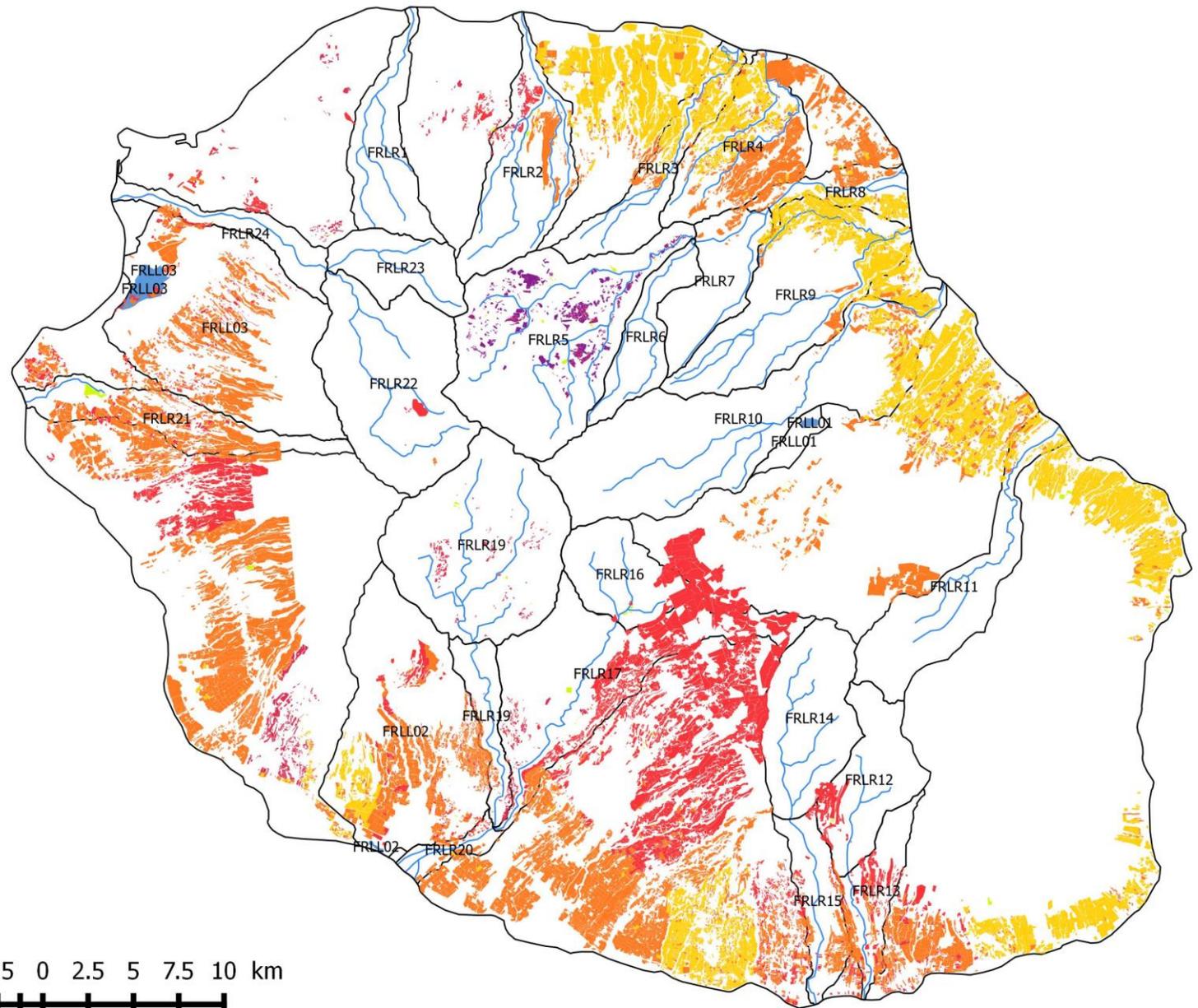
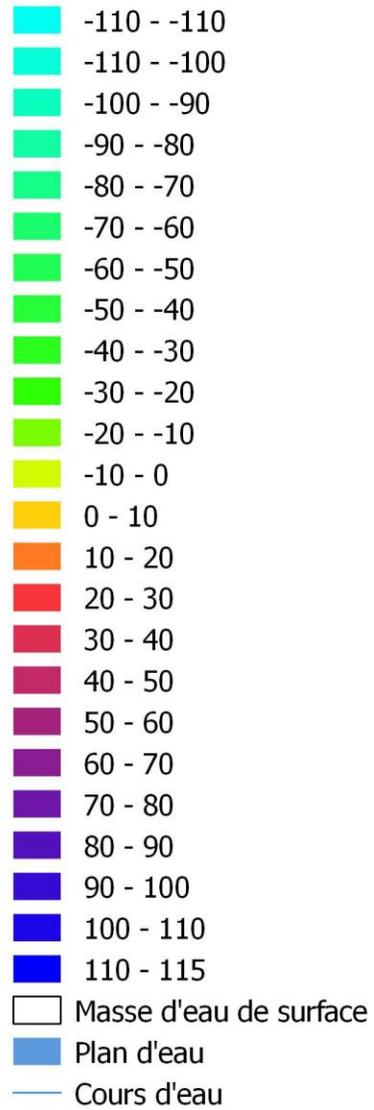


Figure 22 - Carte de la balance azotée à l'hectare calculée à la parcelle selon RB

CARTE DE LA BALANCE AZOTEE PAR HECTARE CALCULEE A LA PARCELLE SELON LA REPARTION RB

Légende

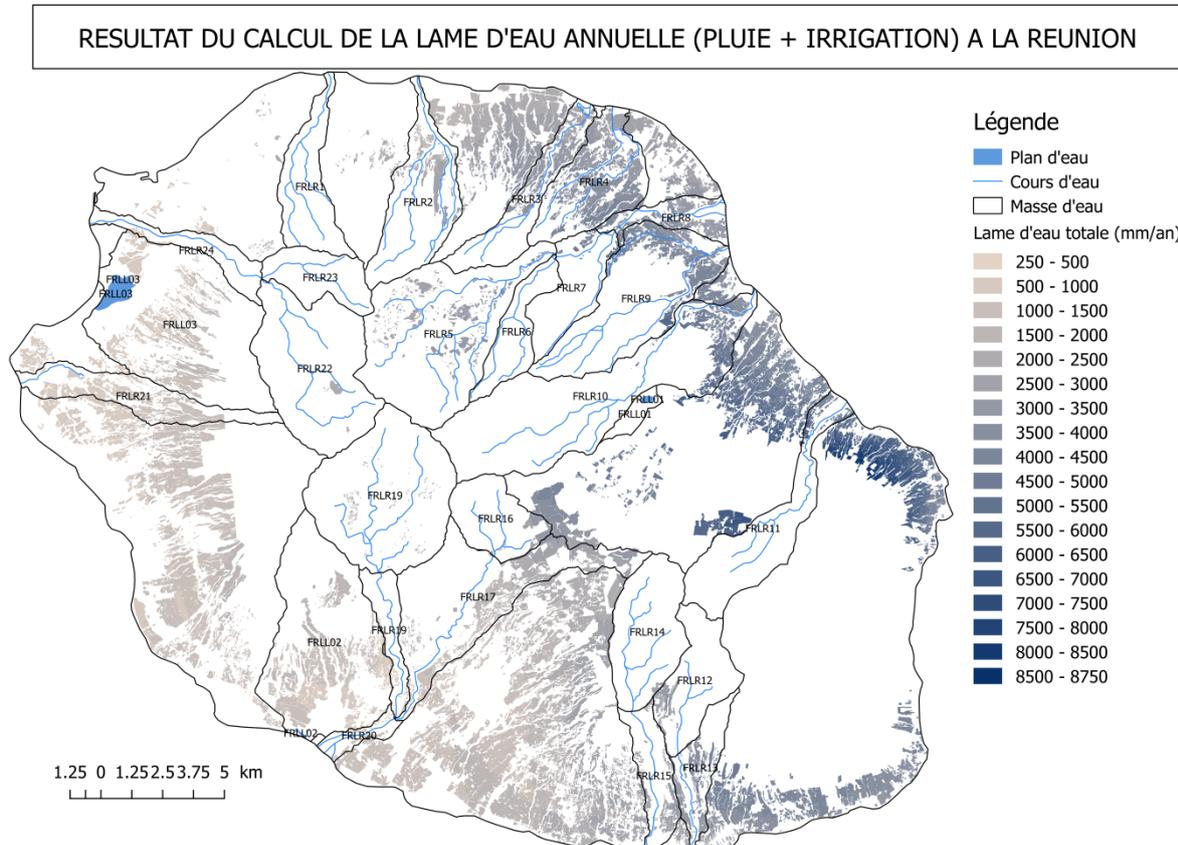
Balance azotée par parcelle (kg N/ha)



#### 4. Estimation et spatialisation de la lame d'eau à l'échelle de la parcelle

La lame d'eau a été calculée à partir des données cartographiées de météo France sur la pluviométrie moyenne annuelle de 1980 à 2010, de la carte des périmètres irrigués et des quantités d'eau apportées par irrigation par périmètre et par an (cf. annexe 8.7). L'addition de la pluviométrie et des millimètres irrigués pour les parcelles situées sur les périmètres irrigués pour chaque parcelle donne la Figure 23 après spatialisation.

Figure 23 - Résultat de la lame d'eau calculée par parcelle



#### 5. Estimation et spatialisation de l'azote lixivié par hectare à l'échelle de la parcelle

Pour estimer l'azote lixivié, on suppose que la part de la balance azotée qui est lixiviée est uniquement fonction de la lame d'eau.

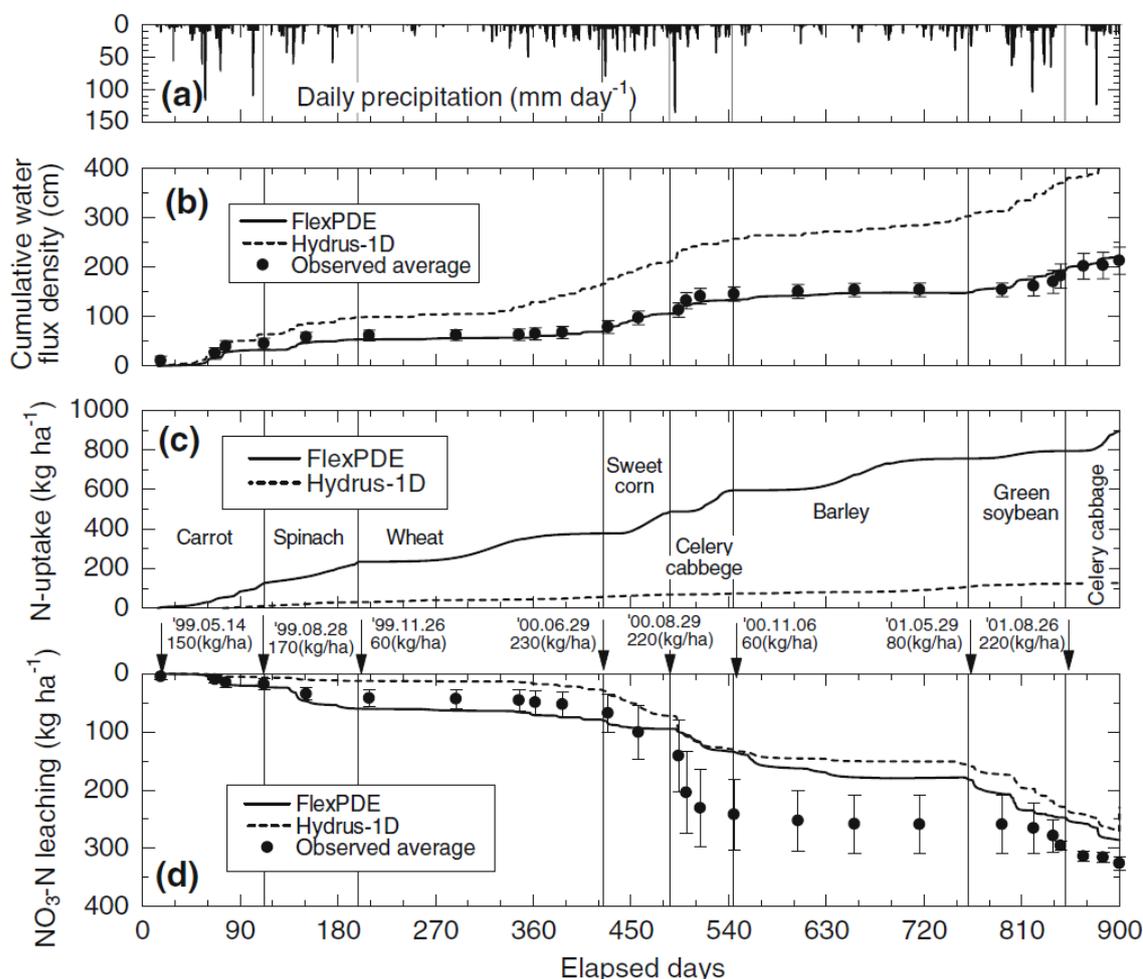
$$\frac{N_{lixivié}}{Balance\ N} = f(\text{lame d'eau})$$

Peu de données sont disponibles pour évaluer cette part d'azote lixivié sur andosol. Parmi elles, l'étude de Endo, *et al.* (2009) est un travail de modélisation des transferts de nitrates adapté aux caractéristiques spécifiques des andosols grâce à un solveur développé à partir de données météorologiques, de la chaîne de nitrification/dénitrification de l'azote dans les sols et d'un système de culture pour évaluer la lixiviation des nitrates sur un andosol cultivé. La validité du modèle a été testée en comparant les résultats calculés avec les résultats d'une expérimentation en utilisant un lysimètre capillaire sur trois années consécutives. L'expérimentation a eu lieu à Tochigi au Japon avec la rotation suivante sur trois ans : carotte, épinard, blé, maïs, chou chinois, orge, soja, chou chinois. Les résultats calculés par le modèle étaient pertinents selon les auteurs.

Les données de pluviométrie et de quantité d'azote lixiviée mesurée dans cette étude ont été reprises. Les données simulées de quantité d'azote absorbée par les plantes ont aussi été utilisées afin de calculer la balance azotée des parcelles de l'étude. Tous ces éléments nous ont permis de construire une courbe de tendance linéaire de la part de la balance azotée qui est lixiviée sur andosol en fonction de la

pluviométrie. L'équation de cette courbe a ensuite été utilisée pour estimer les pertes d'azote par lixiviation dans notre cas d'étude.

**Figure 24 - (a) les précipitations quotidiennes, (b) pluviométrie cumulée à z = 90 cm, (c) azote inorganique absorbé par les racines de la plante cumulé et (d) les nitrates lixiviés à z = 90 cm. Le moment et la quantité d'azote ((NH4) 2 SO4) appliquée sont indiqués par des flèches et des doses.**  
Extrait de (Endo *et al.*, 2009)



Pour estimer les balances azotées annuelles de l'étude d'A.Endo *et al.* (*Ibid.*) nous avons soustrait les quantités d'azote absorbées par les cultures simulées lors de leurs travaux aux quantités d'azote apportées. Ces deux données ont préalablement dû être converties à l'échelle temporelle de l'année. Pour les cultures d'hiver s'étalant sur deux années, les apports d'azote ont lieu fin novembre au semis de la culture. Bien que l'azote apporté soit minéral et donc facilement absorbable ou transportable, on remarque sur la Figure 24 que son absorption et sa lixiviation sont très étalées. On suppose donc que l'azote apporté la première année agit aussi sur la deuxième et on divise la balance azotée en deux sur les deux années concernées.

Soit  $n$  une année,

Soient  $i$  une culture et  $k$  le nombre de cultures cultivées sur la parcelle d'essai au cours de l'année  $n$ ,

Soit  $Balace N_n$  la balance azotée de la parcelle d'essai pour l'année  $n$ ,

Soient  $QN_{apporté i}$  la quantité d'azote apportée sur la culture  $i$  et  $QN_{absorbé i}$  la quantité d'azote absorbée par la culture  $i$ ,

$$Balace N_n = \sum_i^k QN_{apporté i} - QN_{absorbé i}$$

**Tableau 13 - Estimation des balances azotées annuelles<sup>1</sup>**

| Année      | Cultures            | Quantité d'azote absorbée par la culture (kg N/ha) | Quantité d'azote apportée (kg N/ha) | Balance azotée annuelle (kg N/ha) |
|------------|---------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>n</b>   | <b>Carotte</b>      | <b>151</b>                                         | <b>150</b>                          | -0,5                              |
|            | <b>Epinard</b>      | <b>124</b>                                         | <b>170</b>                          |                                   |
|            | <b>Blé</b>          | <b>75,5</b>                                        | <b>30</b>                           |                                   |
| <b>n+1</b> | <b>Blé</b>          | <b>75,5</b>                                        | <b>30</b>                           | 120,5                             |
|            | <b>Maïs</b>         | <b>116</b>                                         | <b>230</b>                          |                                   |
|            | <b>Chou chinois</b> | <b>168</b>                                         | <b>220</b>                          |                                   |
|            | <b>Orge</b>         | <b>88,5</b>                                        | <b>30</b>                           |                                   |
| <b>n+2</b> | <b>Orge</b>         | <b>88,5</b>                                        | <b>30</b>                           | 88,5                              |
|            | <b>Soja vert</b>    | <b>37</b>                                          | <b>80</b>                           |                                   |
|            | <b>Chou chinois</b> | <b>116</b>                                         | <b>220</b>                          |                                   |

Les résultats du calcul sont exposés dans le  $Balance N_n = \sum_i^k QN_{apporté i} - QN_{absorbé i}$

Tableau 13 : on obtient des balances azotées comprises entre -0,5 et 120,5 kg N/ha. Le Tableau 14 nous donne les données utilisées pour la construction d'une courbe de tendance. On a d'abord calculé la part de la balance azotée qui est lixiviée. Cependant, ce chiffre n'est pas pertinent lorsque la balance azotée est négative. Bien que les pertes soient plus faibles dans ce cas, on en constate tout de même un peu, selon les résultats de l'étude d'A. Endo *et Al.* (*Ibid.*). Nous prendrons donc, si la balance azotée est négative, le calcul de la part d'azote apportée qui est lixiviée.

**Tableau 14 - Pluviométrie, fertilisation et azote lixivié<sup>1</sup>**

| Année      | Mm pluie | de N apporté (kg N/ha) | Balance azotée | N lixivié (kg N/ha) | N lixivié / Balance azotée (%) | N lixivié / N apporté (%) |
|------------|----------|------------------------|----------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------|
| <b>n</b>   | 250      | 380                    | -0,5           | 5                   | -1000                          | 1                         |
| <b>n</b>   | 350      | 380                    | -0,5           | 10                  | -2000                          | 3                         |
| <b>n</b>   | 500      | 380                    | -0,5           | 15                  | -3000                          | 4                         |
| <b>n</b>   | 600      | 380                    | -0,5           | 40                  | -8000                          | 11                        |
| <b>n</b>   | 700      | 380                    | -0,5           | 45                  | -9000                          | 12                        |
| <b>n+1</b> | 0        | 510                    | 120,5          | 10                  | 8                              | 2                         |
| <b>n+1</b> | 250      | 510                    | 120,5          | 55                  | 46                             | 11                        |
| <b>n+1</b> | 400      | 510                    | 120,5          | 105                 | 87                             | 21                        |
| <b>n+1</b> | 550      | 510                    | 120,5          | 180                 | 149                            | 35                        |
| <b>n+2</b> | 250      | 300                    | 88,5           | 70                  | 79                             | 23                        |
| <b>n+2</b> | 500      | 300                    | 88,5           | 100                 | 113                            | 33                        |
| <b>n+2</b> | 750      | 300                    | 88,5           | 120                 | 136                            | 40                        |
| <b>n+2</b> | 1000     | 300                    | 88,5           | 145                 | 164                            | 48                        |

L'équation de la courbe de tendance linéaire de la part d'azote lixivié sur la balance azoté en fonction de la pluviométrie (cf. Figure 25), dans les cas où la balance azotée est positive, donne une équation  $y = 0,0016x + 0,2485$  avec un coefficient de régression de 0,861. Ce qui signifie que :

Si  $B_{azotée i} > 0$ ,

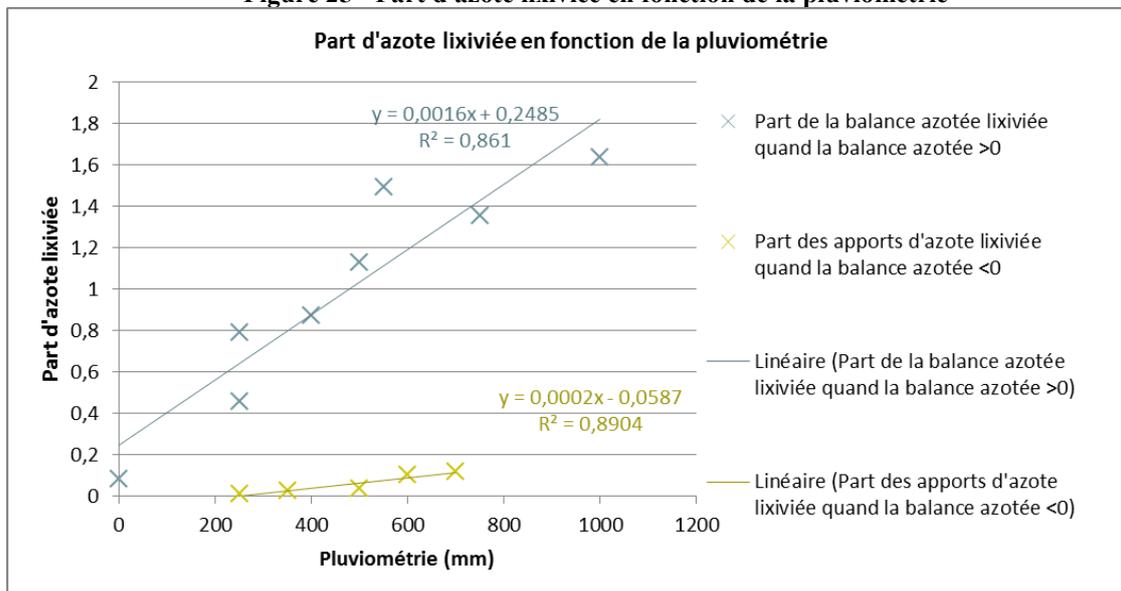
$$N_{lixivié i} = (0,0016 \times P_{annuelle i} + 0,2485) \times B_{azotée i}$$

Où  $i$  est une parcelle,

<sup>1</sup> En gras les données extraites de (Endo, et al., 2009), en italique, les données calculées.

$N_{lixivié\ i}$  est la quantité d'azote lixivié sur la parcelle  $i$ ,  
 $P_{annuelle\ i}$  est la pluviométrie annuelle sur la parcelle  $i$ ,  
 Et  $B_{azotée\ i}$  est la balance azotée de la parcelle  $i$ .

Figure 25 - Part d'azote lixiviée en fonction de la pluviométrie



Pour les cas où la balance azotée est négative, La part d'azote apportée qui sera lixiviée en fonction de la pluviométrie est estimée par l'équation  $y = 0,0002x - 0,0587$  avec  $R^2 = 0,89$ . Ce qui signifie que :

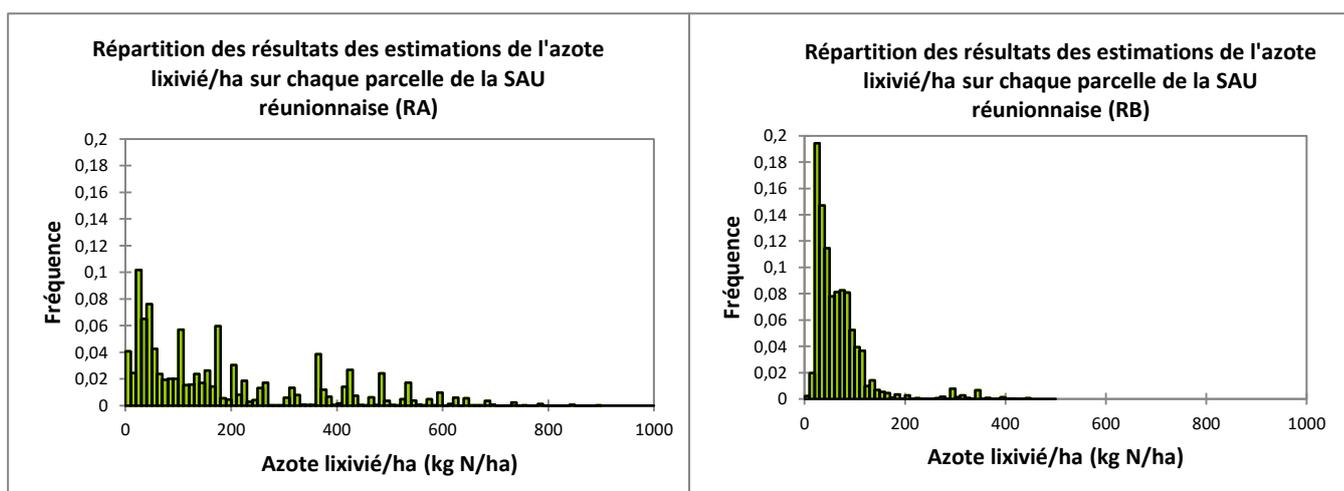
Si  $B_{azotée\ i} < 0$ ,

$$N_{lixivié\ i} = (0,0002 \times P_{annuelle\ i} + 0,0587) \times N_{apporté\ i}$$

Où  $N_{apporté\ i}$  est la quantité d'azote apportée dans l'année sur la parcelle  $i$ .

On a calculé  $N_{lixivié}$  par hectare pour chaque parcelle toujours en comparant les répartitions de l'azote minéral selon les répartitions A et B. Les résultats obtenus se distribuent selon les histogrammes de la Figure 26.

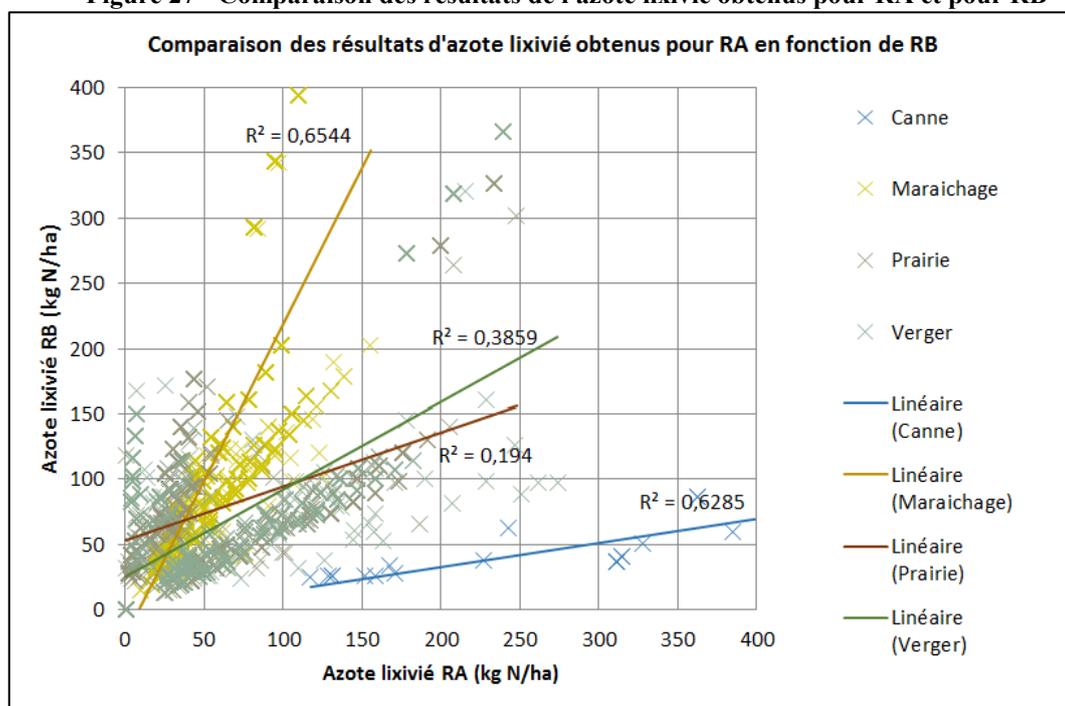
Figure 26 - Histogrammes de la répartition des résultats d'azote lixivié obtenus pour RA et pour RB



Comme pour les résultats de la balance azotée, l'étendue des résultats selon RA est plus grande que pour ceux selon RB. Ainsi, dans le premier cas, les résultats s'étendent de 0 à 894 kg N/ha d'azote lixivié alors que pour le deuxième ils ne dépassent pas 444 kg N/ha.

La Figure 27 compare les résultats du calcul de l'azote lixivié obtenu avec la répartition B en fonction de ceux obtenus avec la répartition A. Les résultats pour la classe de cultures maraîchage sont globalement plus élevés selon la répartition B que selon la répartition A. Prairies et vergers obtiennent des résultats légèrement plus faibles avec RB qu'avec RA. Enfin, la culture de canne obtient des résultats beaucoup plus faibles avec RB par rapport à ceux obtenus avec RA.

**Figure 27 - Comparaison des résultats de l'azote lixivié obtenus pour RA et pour RB**



### ***Spatialisation de l'azote lixivié par hectare à l'échelle de la parcelle***

La spatialisation des résultats avec répartition selon les acteurs est représentée par la Figure 28. On voit bien que les quantités d'azote lixivié les plus faibles se situent dans les hauts de l'île, là où les prairies dominent. Les cultures de canne, plus proches de la côte obtiennent les résultats les plus élevés. Sur ces parcelles de cannes, on remarque l'influence du facteur lame d'eau intégré à l'indicateur puisqu'un gradient positif apparaît de l'Ouest à l'Est, l'Est recevant la plus grande quantité d'eau.

La Figure 29 représente la carte de l'azote lixivié par hectare selon la répartition B. Comme pour la balance azotée, la hiérarchie entre canne et prairie semble inversée par rapport à la répartition A. C'est sur les hauts de l'île que les fuites par lixiviation paraissent les plus importantes. L'influence de la lame d'eau apparaît moins marquée que pour la première carte. Cela est dû à l'étendue plus étroite des résultats de balance azotée.

Ainsi, la vision des acteurs sur les pratiques ne correspondent pas aux recommandations théoriques. La plus grande étendue des résultats avec la répartition A suppose que les agriculteurs aient tendance à sous-fertiliser ou à sur-fertiliser par rapport aux besoins théoriques de la culture. La répartition A apportant d'avantage d'azote sur canne laisse penser que cette culture aurait tendance à être sur-fertilisée : la répartition selon les dires d'acteurs propose une part de l'azote importé beaucoup plus importante sur la canne que la répartition B. Il en résulte un apport d'azote minéral à l'hectare de 162 kg N/ha alors que les besoins sont estimés à 96 kg N/ha. C'est la classe de culture pour laquelle les surplus d'azote minéral sont les plus élevés. L'ajout dans un second temps des apports d'azote organique augmente encore un peu cet excès.

A l'inverse, toujours selon la répartition A, les cultures maraîchères se retrouvent avec des apports d'azote minéral inférieur à leurs besoins : 86 kg N/ha/an apportés pour un besoin théorique de 196 kg/ha/an. Les apports d'azote organique ne dépassant pas les 49 kg N/ha/an selon nos calculs.

Figure 28 - Carte de l'azote lixivié à l'hectare calculé à la parcelle selon RA

CARTE DE L'AZOTE LIXIVIE PAR HECTAIRE CALCULE A LA PARCELLE SELON LA REPARTITION RA

Légende

Azote lixivié par parcelle (kg N/ha)

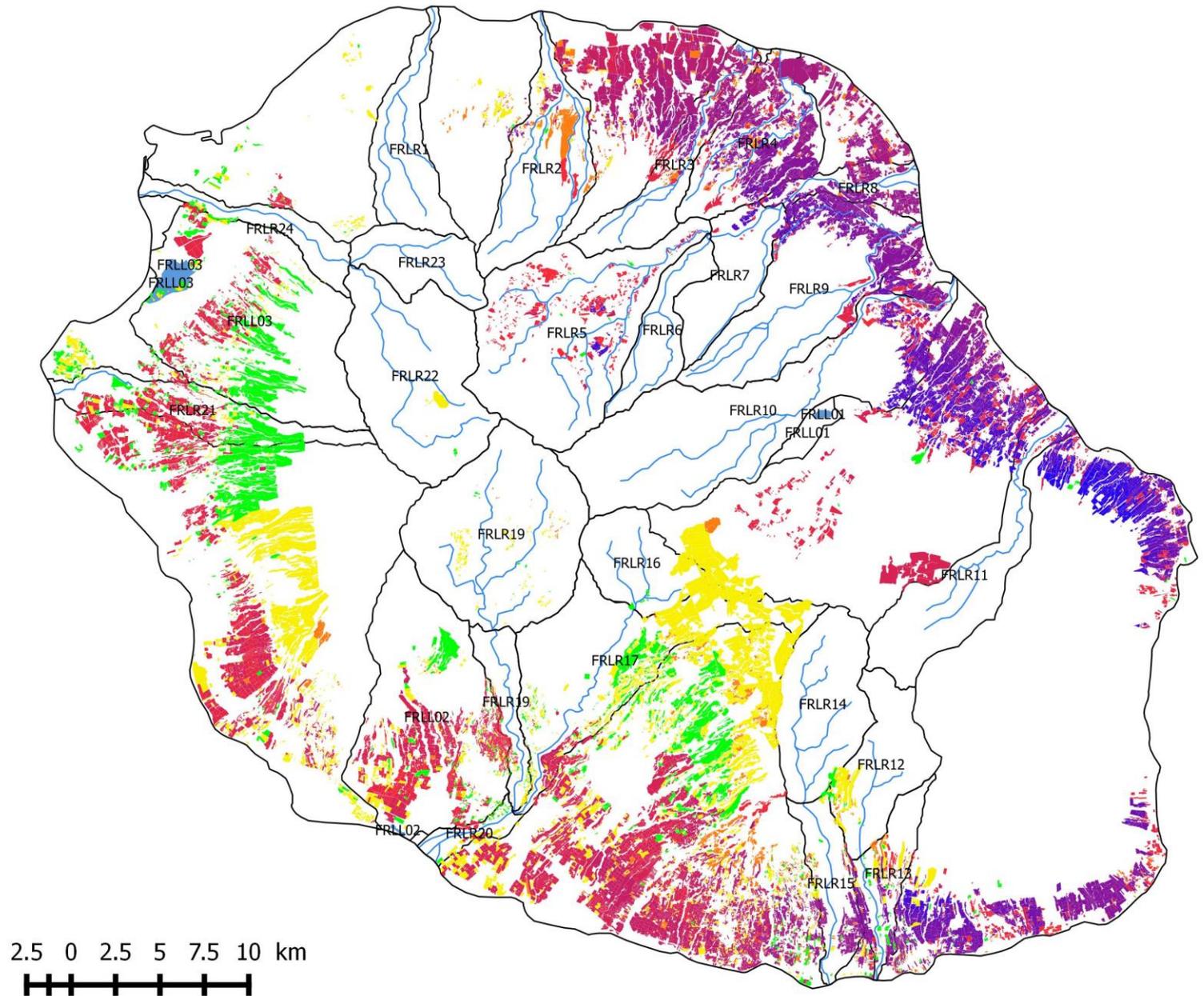
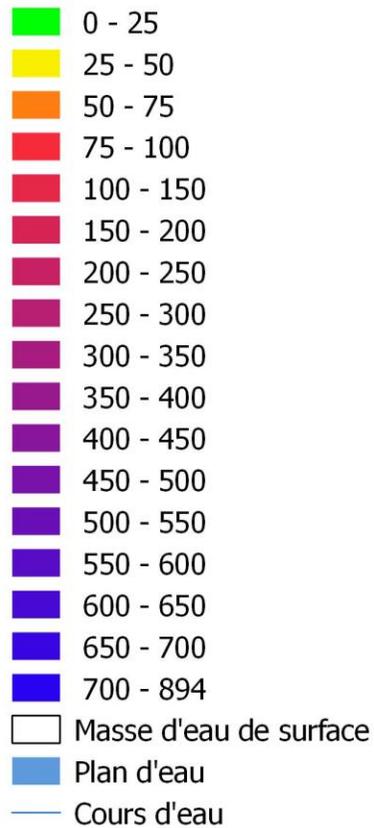
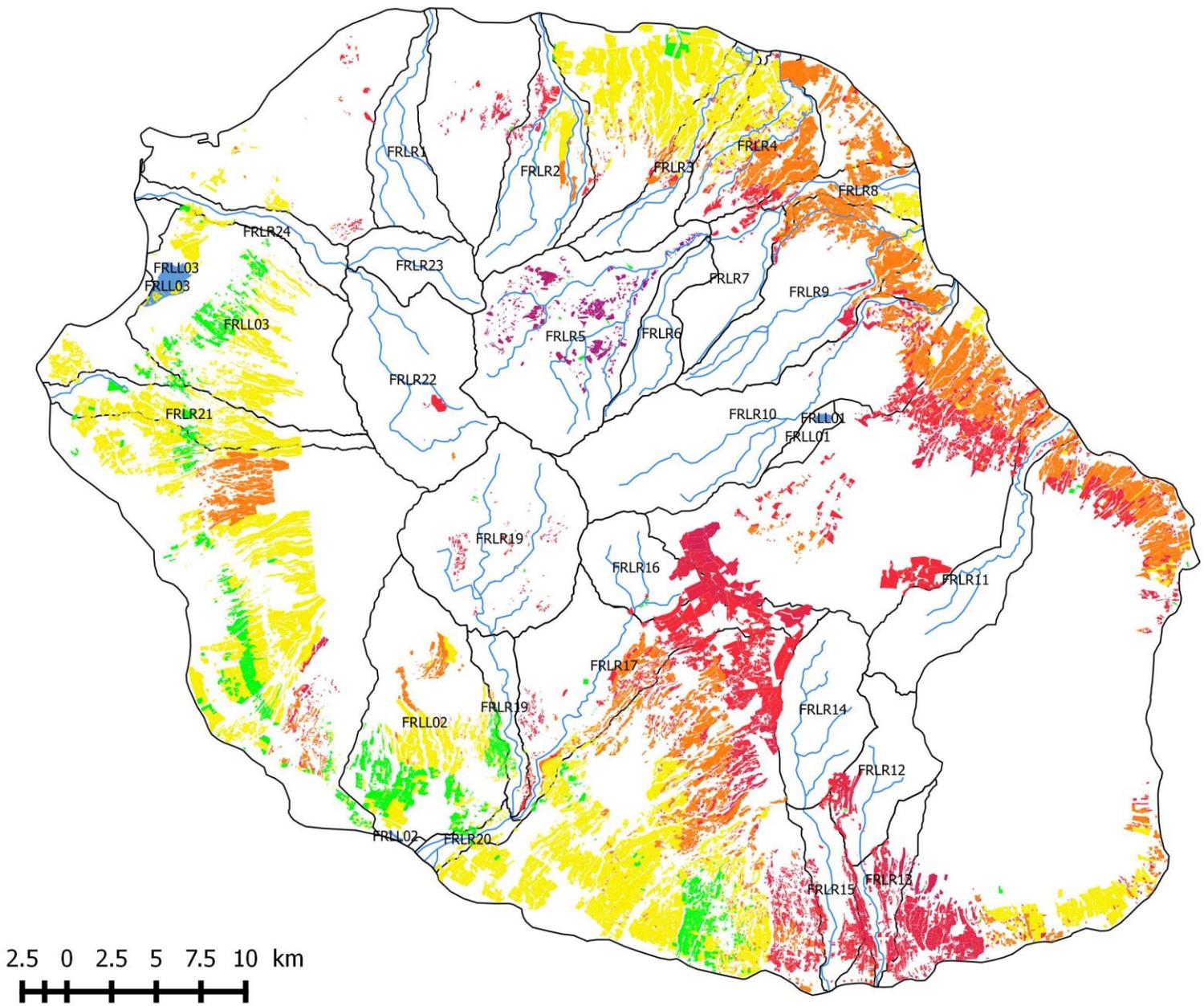
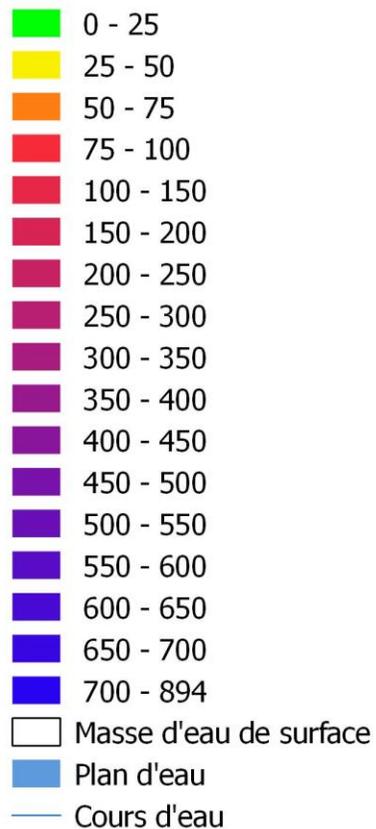


Figure 29 - Carte de l'azote lixivié à l'hectare calculé à la parcelle selon RB

CARTE DE L'AZOTE LIXIVIE PAR HECTAIRE CALCULE A LA PARCELLE SELON LA REPARTITION RB

Légende

Azote lixivié par parcelle (kg N/ha)



## 6. Agrégation des résultats à l'échelle de la masse d'eau

Les résultats précédents étant calculés à l'échelle de la parcelle, ils doivent maintenant être agrégés à l'échelle de la masse d'eau comme l'exige la DCE pour la réalisation de l'état des lieux.

À cet égard, pour chaque parcelle, les quantités d'azote par hectare ont été multipliées par la surface de la parcelle en question. On a ensuite additionné les fuites d'azote par parcelle de toutes les parcelles présentes sur le bassin versant auquel appartient la masse d'eau.

Soit  $i$  une parcelle et  $ME$  une masse d'eau,

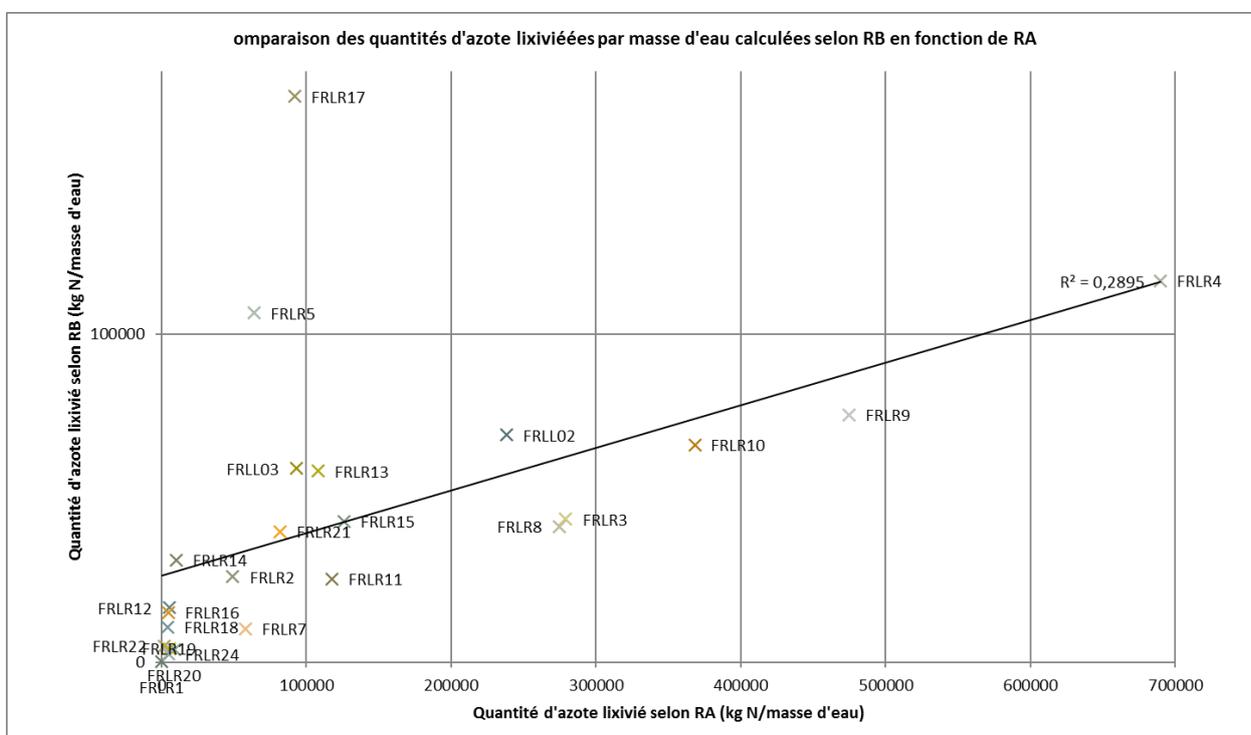
Soit  $n$  le nombre de parcelles situées sur la masse d'eau  $ME$ ,

Soit  $N_{lixivié}(ME)$  la quantité d'azote lixivié dans la masse d'eau  $ME$ ,

Soit  $N_{lixivié\ i}$  la quantité d'azote lixivié par hectare sur la parcelle  $i$ ,

$$N_{lixivié}(ME) = \sum_i^n N_{lixivié\ i} \times Surface_i$$

Figure 30 - Comparaison des quantités d'azote lixiviées par masse d'eau calculées selon RB en fonction de RA



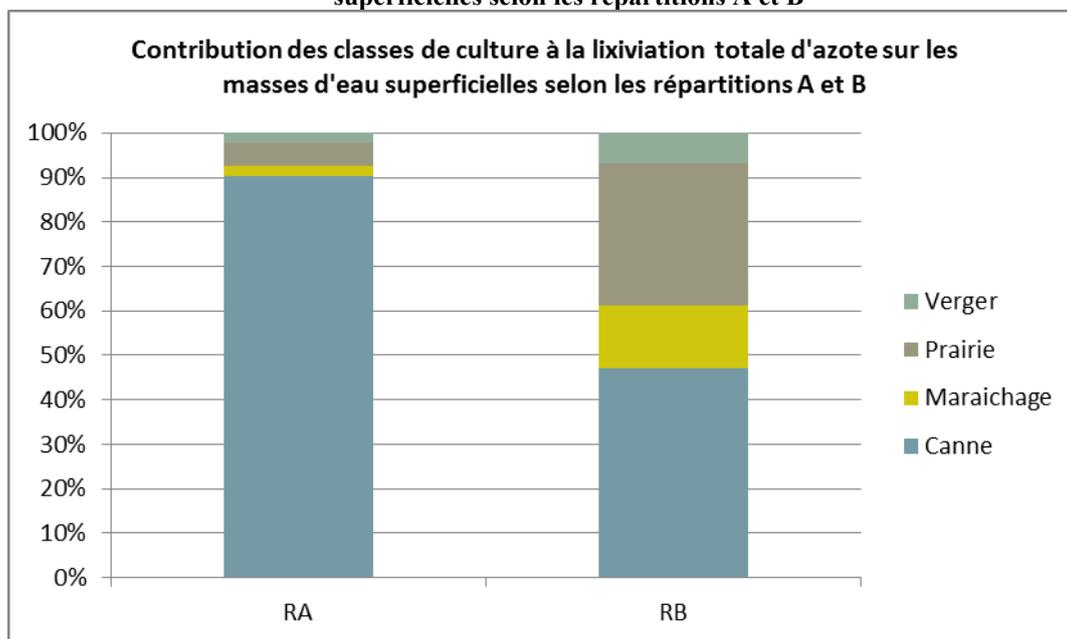
La figure 30 expose les résultats obtenus par masse d'eau avec la répartition B en fonction de ceux obtenus avec la répartition A. L'étendue des résultats avec la répartition A est ici encore la plus grande. Les résultats sont globalement plus élevés selon la répartition A que selon la répartition B.

Si l'on compare les hiérarchies respectives des fuites d'azote selon les deux répartitions, celles-ci semblent s'accorder sur la présence de plus fortes fuites d'azote sur les masses d'eau FRLR4, FRLR9, FRLR10 et FRLR2. De la même manière, les deux méthodes concordent sur le fait que les masses d'eau FRLR1, FRLR6, FRLR7, FRLR20, FRLR23, FRLR22 et FRLR24 subissent une plus faible pression que les autres.

On observe, au contraire, un contraste concernant les masses d'eau FRLR5 et FRLR17 qui ont obtenues des résultats relativement élevés uniquement selon RB. Cela peut s'expliquer par le fait que FRLR5 a une forte part de sa SAU occupée par cultures maraichères et FRLR 17, par les prairies.

La Figure 31 présente la contribution de chaque classe de culture à la lixiviation totale sur les masses d'eau superficielles selon les répartitions A et B. Selon les acteurs, la canne est la culture d'où provient la plus grande part d'azote lixivié dans les masses d'eau superficielle avec presque 90 % des émissions provenant de cette culture. Selon le modèle théorique, la canne est aussi la culture la plus contributrice de pollution azotée mais avec une proportion moindre : 45 % de la pollution des cours d'eau proviendrait de cette culture. Les prairies auraient un rôle beaucoup plus important dans la pollution azotée dans ce cas. Elles seraient responsables de 30 % des fuites d'azote.

**Figure 31 - Contribution des classes de culture à la lixiviation totale d'azote sur les masses d'eau superficielles selon les répartitions A et B**



#### *Spatialisation des résultats par masse d'eau*

Les Figure 32 et 33 présentent la cartographie des résultats par masse d'eau calculés respectivement avec la répartition A et la répartition B.

On observe toujours des différences en fonction des classes de cultures présentes sur les masses d'eau. Sur la première carte, les masses d'eau où se concentrent les cultures de canne sont clairement plus foncées. La deuxième donne des résultats moins tranchés sauf pour FRLR17 qui apparaît nettement plus foncée. Cette dernière contient majoritairement des prairies.

Enfin, plus globalement, les couleurs des cartes ne semblent plus inversées comme c'était le cas avec les précédentes. Cela signifie que le facteur surface agricole intégré lors de l'agrégation a un fort impact sur les résultats.

Figure 32 - Résultat de l'agrégation de l'azoté lixivié à l'échelle de la parcelle RA

CARTE DE L'AZOTE LIXIVIE PAR MASSE D'EAU SELON LA REPARTITION RA

Légende

Quantité d'azote lixivié par masse d'eau (tonnes)

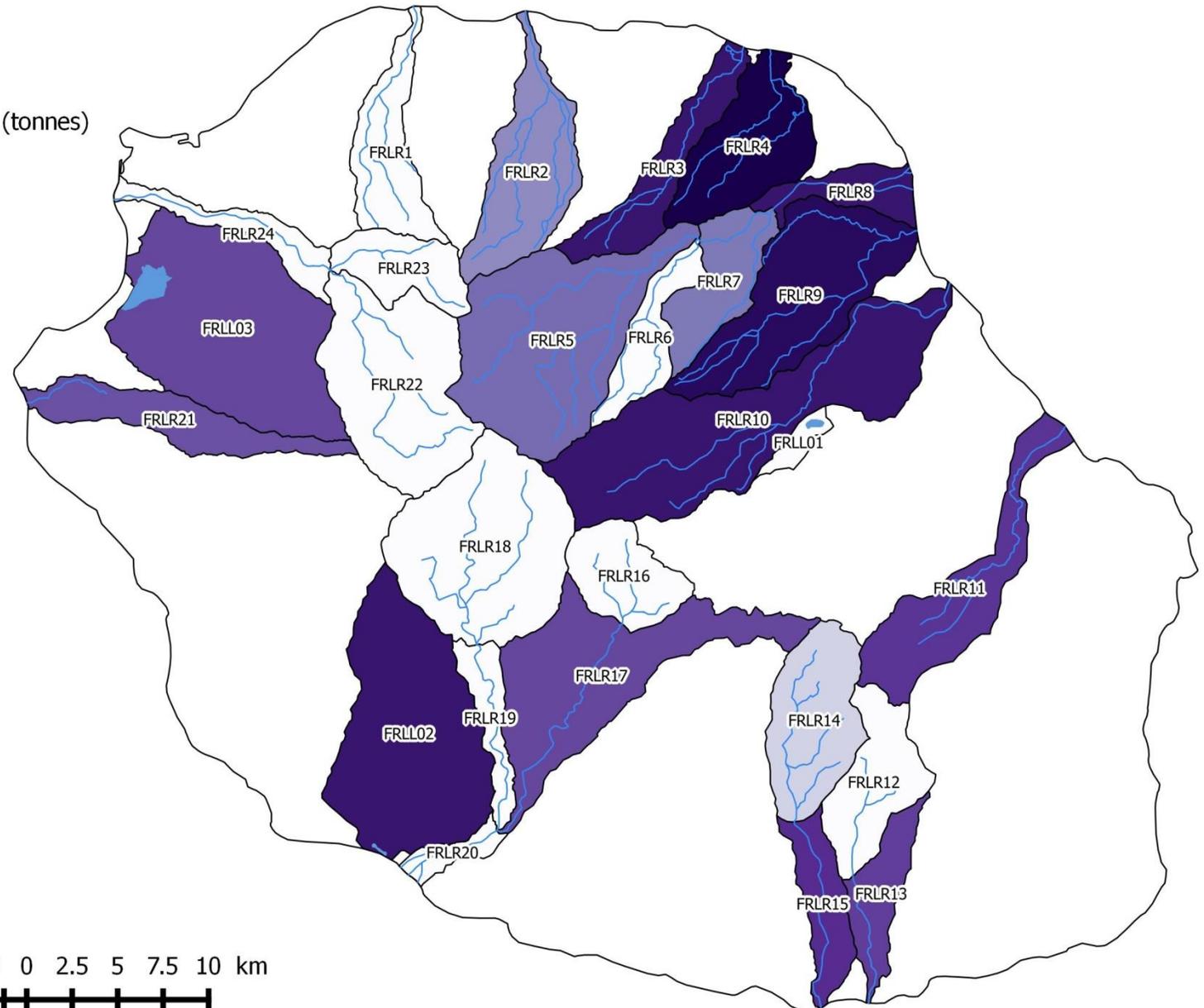
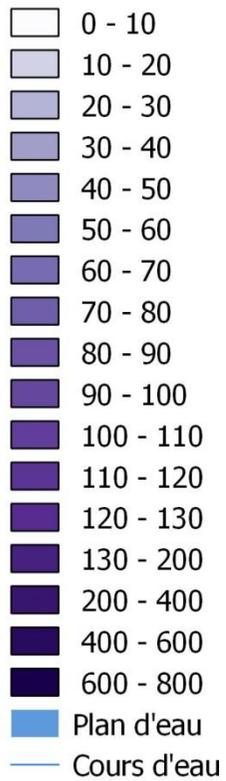


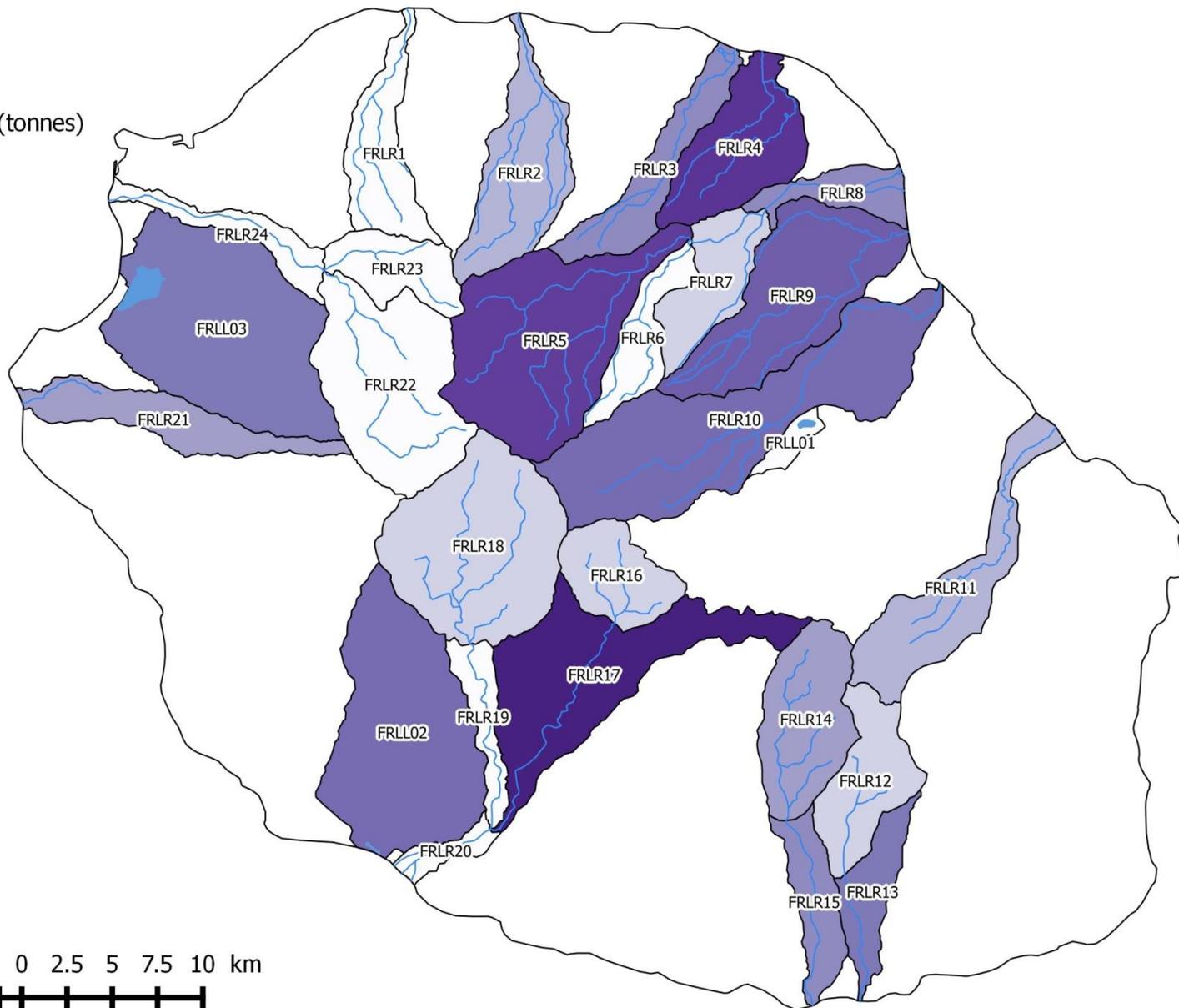
Figure 33 - Résultat de l'agrégation de l'azoté lixivié à l'échelle de la parcelle RB

CARTE DE L'AZOTE LIXIVIE PAR MASSE D'EAU SELON LA REPARTION RB

Légende

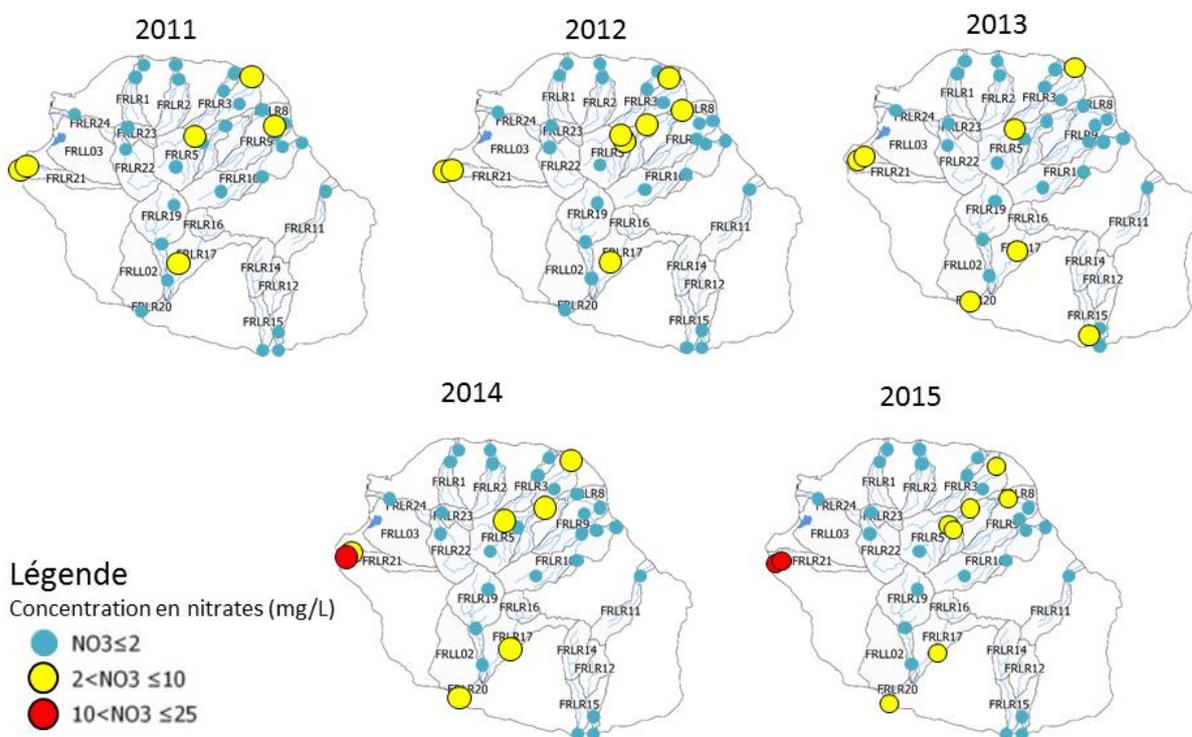
Quantité d'azote lixivié par masse d'eau (tonnes)

- 0 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 110
- 110 - 120
- 120 - 130
- 130 - 200
- 200 - 400
- 400 - 600
- 600 - 800
- Plan d'eau
- Cours d'eau



## V - Comparaison avec les zones à tendance à la hausse : y a-t-il concordance ?

Figure 34 - Evolution de la concentration en nitrates dans les cours d'eau réunionnais de 2011 à 2015



La carte des concentrations en nitrates mesurées dans les cours d'eau réunionnais (Figure 34) montre que les zones où ces concentrations sont les plus élevées sont à l'Ouest. En effet, à partir de 2014, elles dépassent les 10 mg/L. Le cours d'eau concerné correspond à la masse d'eau FRLR21. Quelques points de mesure dépassent les 2 mg/L au Sud-Ouest et au Nord-Est. Ils correspondent à FRLR20 et FRLR17 au Sud et à FRLR4, FRLR5, FRLR6 et FRLR7 au Nord. Le Tableau 15 expose l'estimation de la quantité d'azote lixivié obtenue selon RA et RB. Nous avons aussi catégorisé la pression agricole sur chaque masse d'eau de 'très forte' à 'nulle' selon les deux répartitions. Quatre classes regroupant le même nombre de masses d'eau ont été faites. Les trois masses d'eau restantes ont été catégorisées sous la classe 'pression nulle' puisque les résultats obtenus selon les deux répartitions donnaient une estimation des quantités d'azote lixiviées égale à zéro. Cela parce qu'aucune parcelle ne se trouve sur les masses d'eau en question.

Concernant les masses d'eau où l'on a détecté une présence d'azote, les deux méthodes s'accordent à dire que (1) FRLR4 subit une pression azotée d'origine agricole très forte, (2) la pression est forte sur la masse d'eau FRLR21, (3) elle est faible sur FRLR6.

Pour les autres masses d'eau, les résultats divergent. Soit entre RA et RB : d'après RB, la pression est très forte sur FRLR17 et FRLR5. La répartition A, les range, quant à elles, respectivement en catégorie 'forte' et 'moyenne' ; soit entre nos résultats et la concentration en nitrate mesurée.



# **Partie 4**

## **Discussion**



## I - Les raisons potentielles des différences entre les résultats des estimations et les mesures des concentrations en nitrates dans les cours d'eau

Plusieurs raisons peuvent expliquer les écarts entre résultats des estimations d'azote lixivié et concentrations en nitrates mesurées dans les cours d'eau. Tout d'abord, notre outil ne prend en compte que la pression d'origine agricole. Toutefois, l'agriculture n'est pas toujours la seule responsable de la pollution azotée. L'azote détecté dans une rivière peut provenir d'autres sources comme les eaux usées urbaines ou les rejets industriels (Bengouga, 2010). Nous ne sommes pas capable de déterminer la source d'azote des cours d'eau pollués, on constate cependant que la masse d'eau FRLR21 se situe sur une zone urbanisée et très touristique alors que la masse d'eau FRLR20 se situe sur une zone industrielle.

Tableau 15 - Comparaison des masses d'eau polluées et des résultats

| Masse d'eau | Quantité d'azote lixivié selon RA (kg N/masse d'eau) | Quantité d'azote lixivié selon RB (kg N/masse d'eau) | Pression (RA) | Pression (RB) | Concentration en nitrate du cours d'eau |
|-------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------|---------------|-----------------------------------------|
| FRLR01      | 0                                                    | 0                                                    | Nulle         | Nulle         | <2 mg/L                                 |
| FRLR02      | 238 289                                              | 69 260                                               | Très forte    | Très forte    | <2 mg/L                                 |
| FRLR03      | 92 916                                               | 59 009                                               | Forte         | Forte         | <2 mg/L                                 |
| FRLR1       | 72                                                   | 226                                                  | Faible        | Faible        | <2 mg/L                                 |
| FRLR2       | 49 109                                               | 25 991                                               | Moyenne       | Moyenne       | <2 mg/L                                 |
| FRLR3       | 278 789                                              | 43 602                                               | Très forte    | Forte         | <2 mg/L                                 |
| FRLR4       | 689 519                                              | 116 141                                              | Très forte    | Très forte    | 2 à 10 mg/L                             |
| FRLR5       | 63 712                                               | 106 445                                              | Moyenne       | Très forte    | 2 à 10 mg/L                             |
| FRLR6       | 0                                                    | 0                                                    | Nulle         | Nulle         | 2 à 10 mg/L                             |
| FRLR7       | 57 661                                               | 10 237                                               | Moyenne       | Faible        | 2 à 10 mg/L                             |
| FRLR8       | 274 540                                              | 41 359                                               | Très forte    | Forte         | <2 mg/L                                 |
| FRLR9       | 474 507                                              | 75 442                                               | Très forte    | Très forte    | <2 mg/L                                 |
| FRLR10      | 368 151                                              | 66 283                                               | Très forte    | Très forte    | <2 mg/L                                 |
| FRLR11      | 117 647                                              | 25 362                                               | Forte         | Moyenne       | <2 mg/L                                 |
| FRLR12      | 5 262                                                | 16 566                                               | Faible        | Moyenne       | <2 mg/L                                 |
| FRLR13      | 108 295                                              | 58 225                                               | Forte         | Forte         | <2 mg/L                                 |
| FRLR14      | 10 108                                               | 31 201                                               | Moyenne       | Moyenne       | <2 mg/L                                 |
| FRLR15      | 125 929                                              | 42 999                                               | Forte         | Forte         | <2 mg/L                                 |
| FRLR16      | 4 552                                                | 15 181                                               | Faible        | Moyenne       | <2 mg/L                                 |
| FRLR17      | 91 729                                               | 172 357                                              | Forte         | Très forte    | 2 à 10 mg/L                             |
| FRLR18      | 4 401                                                | 10 708                                               | Faible        | Moyenne       | <2 mg/L                                 |
| FRLR19      | 5 348                                                | 4 156                                                | Moyenne       | Faible        | <2 mg/L                                 |
| FRLR20      | 9 037                                                | 3 841                                                | Moyenne       | Faible        | 2 à 10 mg/L                             |
| FRLR21      | 81 707                                               | 39 694                                               | Forte         | Forte         | 10 à 25 mg/l                            |
| FRLR22      | 1 817                                                | 4 949                                                | Faible        | Faible        | <2 mg/L                                 |
| FRLR23      | 0                                                    | 0                                                    | Nulle         | Nulle         | <2 mg/L                                 |
| FRLR24      | 4 567                                                | 2 421                                                | Faible        | Faible        | <2 mg/L                                 |

Ces écarts soulèvent aussi la question de la surface de contribution au cours d'eau : la présence de nappes perchées dans une zone pourrait entrainer l'eau et les nitrates tombés sur une masse d'eau frontalière. Les bassins versants des masses d'eau FRLR6 et FRLR7 se situent sur une zone dominée par les forêts avec une faible densité de population et une faible SAU. La présence d'azote dans ces cours d'eau ne peut donc pas être expliquée par une forte pression agricole, urbaine ou industrielle. Cependant, les masses d'eau FRLR5, FRLR9 et FRLR10 qui entourent FRLR6 et FRLR7 subissent des pressions agricoles très fortes selon nos résultats. Toutefois, on ne détecte aucune trace d'azote dans les cours d'eau des masses FRLR9 et 10. On pourrait émettre l'hypothèse d'un transfert des masses d'eau FRLR9 et FRLR10 aux masses d'eau FRLR6 et FRLR7.

Cette question reste à creuser notamment via des simulations en redessinant les contours des surfaces de contribution à chaque masse d'eau (élargissement de la surface du bassin versant).

Enfin, on ne doit pas perdre de vue le fait que la pollution azotée des cours d'eau n'est pas un processus mono factoriel. Une pression agricole importante ne se reflète pas toujours dans l'état actuel des rivières. Elle pourra être détectée à des échelles de temps plus importantes ou alors n'apparaîtra jamais dans les cours d'eau parce qu'elle sera absorbée ou stockée par des facteurs non considérés dans notre étude (sol, masses d'eau souterraines, zones tampon, etc.).

## **II - Démarche participative et démarche théorique**

Le manque de données sur les pratiques de fertilisation nous a contraints à estimer l'un des paramètres de notre indicateur : celui de la répartition de l'azote importé. Pour cela, plusieurs méthodes nous permettaient d'aborder ce problème. On connaît les besoins théoriques des cultures mais on sait que les agriculteurs ne se basent pas que sur ces besoins pour raisonner leurs apports. De nombreux déterminants : facteurs économiques, facteurs concernant l'attention portée à la culture ou encore d'autres concernant les connaissances agronomiques des agriculteurs peuvent jouer un rôle très important. Par conséquent, on a supposé que le point de vue des acteurs locaux pourrait mieux refléter la réalité. Cependant, eux-mêmes sont sujets à caution : les résultats à dire d'acteurs vont à l'encontre de ceux des enquêtes de la DAAF sur quelques cultures maraichères selon lesquelles le chou et la salade seraient en moyenne sur-fertilisées (DAAF La Réunion, 2016) alors que les acteurs les estimaient sous-fertilisées. Des réserves sont donc émises sur les deux répartitions et nous ne sommes actuellement pas en capacité de trancher pour dire laquelle correspond le plus aux pratiques réelles. Toutefois, bien que le recours aux acteurs n'ait pas permis d'établir une répartition de l'azote fiable, elle a eu d'autres intérêts. Leurs points de vue ont notamment permis d'établir une représentation adaptée aux conditions locale grâce à laquelle on a pris conscience qu'il était plus pertinent de construire un nouvel indicateur plutôt que de tenter d'en adapter un existant. L'implication des acteurs a aussi permis de susciter leur intérêt pour ce travail et d'améliorer leur appropriation de l'outil. Cela a une grande importance puisque ce sont eux les utilisateurs finaux.

Malgré des hypothèses initiales très différentes, le classement des pressions par masses d'eau après agrégation convergent. Cela peut s'expliquer par le fait que la masse d'eau intègre les parcelles selon un gradient altitudinal. L'occupation des sols, à La Réunion, est, lui aussi, déterminé par l'altitude. Une masse d'eau comportera donc toute la gamme de cultures présente sur le territoire ce qui peut avoir un effet de compensation entre les cultures. Le facteur surface peut aussi avoir pour effet la convergence des résultats : une masse d'eau comportant plus de surface agricole subira, peu importe les cultures, une pression plus importante qu'une masse d'eau où la SAU est moindre.

## **III - Qu'est-ce qu'apporte cet indicateur par rapport aux précédents ?**

Pour analyser la valeur de notre outil, on se base sur les trois propriétés de base d'un indicateur bien construit selon Gingras (2008).

### **1. Adéquation à l'objet**

Une bonne adéquation de l'indicateur à l'objet signifie que la mesure est appropriée au phénomène évalué. Autrement dit, que les résultats produits sont de bon ordre de grandeur.

Les estimations de l'azote lixivié à l'échelle du profil de sol que l'on a obtenue sont d'un ordre de grandeur légèrement élevé. En effet, nos résultats à l'échelle de la parcelle varient de 0 à 894 kg N/ha/an d'azote lixivié pour des apports de 0 à 210 kg N/ha/an. En comparaison, l'étude « SIMBA-N: Modeling nitrogen dynamics in banana populations in wet tropical climate. Application to fertilization management in the Caribbean » (Dorel, et al., 2008) qui tente de modéliser l'azote lixivié sous une bananeraie aux Antilles obtient un résultat moyen de 1196 kg N/ha sur andosol sur deux ans, ce qui correspond approximativement à 598 kg N/ha/an pour des apports de 20 à 420 kg N/ha/an. Ce décalage reste cependant raisonnable à l'échelle du profil de sol.

Afin de définir si l'indicateur est en adéquation avec l'objet à l'échelle de la masse d'eau, nous avons mis en relation les quantités d'azote lixivié et les débits de quelques cours d'eau (ceux pour lesquels la donnée « débit moyen annuel » est disponible). Nous avons ainsi calculé la concentration en azote du cours d'eau

dans le cas où l'azote polluant la rivière serait égal à nos estimations des pertes azotées d'origine agricole. On obtient les concentrations synthétisées dans le Tableau 16.

**Tableau 16 - Calcul des concentrations en azote des cours d'eau à partir de nos estimations**

| Masse d'eau | Débit (m3/s) | Débit (m3/an)  | Concentration en azote calculé (RA) (mg/L) | Concentration en azote calculé (RB) (mg/L) |
|-------------|--------------|----------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| FRLR4       | 559,00       | 17 630 860 000 | 0,04                                       | 0,01                                       |
| FRLR5       | 5,83         | 183 878 200    | 0,35                                       | 0,58                                       |
| FRLR7       | 1,61         | 50 779 400     | 1,14                                       | 0,20                                       |
| FRLR8       | 181,00       | 5 708 740 000  | 0,05                                       | 0,01                                       |
| FRLR9       | 3,65         | 115 121 000    | 4,13                                       | 0,65                                       |
| FRLR10      | 10,70        | 337 478 000    | 1,09                                       | 0,20                                       |
| FRLR13      | 1,88         | 59 295 200     | 1,82                                       | 0,98                                       |

Les concentrations calculées sont d'un bon ordre de grandeur puisqu'elles sont comprises entre 0 et 5 mg/L. Le manque de données de débit ne nous permet pas d'analyser la corrélation entre les concentrations mesurées et calculées. On peut cependant considérer que l'indicateur est aussi en adéquation avec l'objet à l'échelle de la masse d'eau.

Par rapport aux indicateurs utilisés dans le précédent état des lieux, la pression azotée organique est précisée via la conversion en équivalence engrais alors que l'ancien indicateur considérait toutes les matières organiques produites de la même manière (cheptel du bassin versant sur le cheptel total de l'île). L'indicateur de pression azotée utilisé précédemment (SAU sur la surface totale du bassin versant) était très robuste et semblait varier peu dans le temps puisque la SAU est une donnée peu variable. De plus, notre travail apporte l'intégration de la dimension 'climat' à l'évaluation via la lame d'eau. Celle-ci semble être un facteur important et très variable à l'échelle du territoire. Ces éléments supplémentaires améliorent la valeur du diagnostic de notre outil par rapport à l'ancien indicateur.

## 2. Homogénéité de la mesure

L'homogénéité de la mesure signifie que l'indicateur a la même composition pour toutes les entités qu'il est destiné à comparer.

Tout comme lors du précédent état des lieux, notre indicateur a été calculé de la même manière et avec les mêmes données d'entrée pour chaque entité que l'on souhaite comparer, c'est-à-dire chaque masse d'eau. L'homogénéité de la mesure est donc toujours respectée.

## 3. Respect de l'inertie propre de l'objet

Cette dernière propriété signifie que la variation de l'indicateur doit être conforme à la variation de l'objet qu'il mesure.

Notre travail considère les quantités d'azote réellement importées et une estimation des gisements produits. La première donnée est mise à jour tous les ans, la deuxième est calculée à partir de l'évolution du cheptel de chaque commune fournie par le recensement agricole mis à jour tous les 10 ans.

On pourra ainsi constater l'évolution de la pression azotée minérale au fil des années. Cependant, concernant l'azote organique, la donnée d'entrée n'est pas mise à jour assez régulièrement pour constater une évolution à chaque état des lieux. Celle-ci pourra être observée tous les deux états des lieux.

Le facteur 'lame d'eau' a été considéré comme constant dans le temps puisque nous avons pris les valeurs de pluviométrie moyenne sur trente ans. Il est cependant envisageable de le traiter comme une variable en prenant la moyenne sur les six ans qui séparent deux états des lieux. On intégrerait ainsi des potentiels changements climatiques et leurs effets sur le processus de pollution azotée.

## Conclusion

L'indicateur développé propose quelque chose de cohérent pour estimer les sorties d'azote à la parcelle et à la masse d'eau. A La Réunion, l'ensemble des données est disponible pour qu'il soit calculé pour chaque

masse d'eau. Toutefois, des échelles de temps différentes pour estimer les apports organiques et minéraux induisent un problème d'inertie provoqué par une mise à jour trop peu fréquente de la donnée « gisement de matière organique ».

## **IV - Les difficultés et les limites de nos travaux**

### **1. Une méthode partiellement participative**

Notre méthodologie se veut participative. Les réunions et le sondage adressé aux acteurs locaux ont contribué à l'intégration de leur point de vue dans le développement de l'indicateur. L'intégration des acteurs à la démarche semble toutefois partielle. En effet, le nombre de réunions réduit a limité l'intervention des parties prenantes. Lors de ces réunions, les discussions sont restées ouvertes et peu structurées ce qui ne nous permettait pas de recueillir les avis de chaque acteur de façon objective et égalitaire, les prises de parole étant très variables d'un acteur à l'autre. Les décisions finales concernant les choix des hypothèses de construction de l'outil ont été prises par l'équipe du Cirad. Au final les éléments factuels manquent et les choix de construction de tels indicateurs sur de grande échelle font appel à de nombreux jugements subjectifs.

Une meilleure efficacité de l'aspect participatif aurait sans doute apportée une plus grande implication des acteurs au projet, un accès facilité aux données et peut-être même des actions complémentaires pour la mise en œuvre du prochain état des lieux. Par exemple, les surfaces épandables sont une donnée qui existe, pourtant, malgré de nombreuses tentatives, il ne nous a pas été possible de la collecter.

Les objectifs d'amélioration ont peu été pris en compte. En effet, les mesures de réduction des fuites d'azote n'ont pas été intégrées à la représentation du processus de pollution. L'indicateur a été construit comme un outil de diagnostic mais n'intègre pas d'évaluation d'actions à mettre en place pour réduire le problème de pollution. L'implication plus approfondie des acteurs pourra nous permettre de faire évoluer l'outil afin de mesurer aussi les efforts fournis par chacun dans le but de diminuer les pertes d'azote.

Enfin, on ne s'est pas encore assuré que l'indicateur réponde bien aux attentes des acteurs. Cela est programmé à la suite du stage grâce à une réunion de restitution.

### **2. Une répartition théorique basée uniquement sur les besoins des cultures**

La répartition théorique de l'azote minéral a été basée sur une approche considérant uniquement les besoins des cultures. Toutefois, ces derniers ne sont pas les seuls facteurs décisifs de l'apport d'engrais. Pour aller plus loin dans la comparaison avec la répartition selon les acteurs, il faudra leur demander les déterminants de cette répartition et les intégrer aussi dans la répartition théorique.

### **3. Un manque de connaissances sur les pratiques de fertilisation réelles**

Une importante limite de cette méthode d'évaluation est sans doute la grande approximation des résultats. Contraints par le manque de données d'entrée concernant notamment les pratiques de fertilisation et les transferts d'azote sur andosols, tous nos calculs se basent sur des hypothèses et des estimations. Celles-ci devront, *a minima*, être confrontées à la vision des acteurs lors d'une réunion de restitution. Elles pourront, surtout, être précisées (1) grâce à des enquêtes auprès des agriculteurs pour établir une répartition plus représentative des pratiques réelles de fertilisation, (2) à partir d'une expérimentation dans le contexte géographique et climatique réunionnais pour valider notre hypothèse au sujet des flux d'azote lixiviés en fonction de la pluviométrie.

## **V - Perspectives : sous quelles conditions cette méthode est-elle applicable à La Réunion et aux autres DOM ?**

Le prochain état des lieux dans le cadre de la DCE aura lieu en 2019. Il faudra donc que l'outil soit opérationnel d'ici là. En ce sens, et puisque nous n'avons pas de clé pertinente d'affectation des quantités d'azote minérale à chaque classe de culture, la question de l'importance de la prise en compte des stratégies culturales doit être soumise aux acteurs. Si la seule prise en compte des parcelles agricoles est suffisante alors on pourrait simplifier l'outil. Sinon, des enquêtes complémentaires permettront d'élaborer une répartition en adéquation avec les pratiques réelles.

Dans le cadre du projet PRESAGRIDOM, l'indicateur devra s'appliquer aux conditions des autres DOM. La Guadeloupe, La Martinique et Mayotte sont tous les trois des départements insulaires volcaniques. Ils sont géologiquement formés de la même manière que La Réunion, leurs systèmes hydrogéologiques paraissent donc relativement similaires. Les sols sont ici aussi majoritairement andiques, les cultures sont semblables et le facteur environnemental influant majoritairement le processus de pollution est, ici aussi, la pluviométrie. Le modèle conceptuel de l'indicateur pourrait, par conséquent, être repris.

Les données d'entrée d'importation d'engrais, la carte d'occupation des sols et les données pluviométriques sont normalement disponibles via les douanes, les DAAF et les stations météo France respectives à chaque DOM. Les données d'irrigation semblent être accessibles auprès des conseils généraux.

Les besoins en azote de chaque classe de culture nécessitent d'être recalculés avec les cultures et leurs surfaces respectives pour chaque DOM.

Les seules données manquantes seront les gisements de matière organique. Toutefois, l'élevage est un secteur beaucoup moins développé dans les autres DOM qu'à l'île de La Réunion. En effet, cette dernière domine largement les productions issues des élevages bovins laitiers, porcins, ovins, caprins et de volailles (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2015). On pourrait supposer que la part d'azote organique contribuant à la pression azotée est négligeable sur ces territoires. Cette hypothèse serait cependant à valider avec les acteurs locaux.

La Guyane étant un territoire très différent des autres DOM, le travail réalisé ici ne semble pas adaptable à cette zone. Notre méthode de construction pourrait toutefois être reprise pour construire un indicateur spécifique à ce département.

## Conclusion

La pression azotée d'origine agricole doit être évaluée prochainement dans le cadre de la Directive Cadre sur l'eau dans le but d'atteindre le « bon état » de l'ensemble des masses d'eau d'ici 2023. Notre étude avait pour objectif de construire un outil permettant d'évaluer la pression azotée d'origine agricole impactant la qualité des eaux de surface, à l'échelle de la masse d'eau, dans le contexte réunionnais et plus largement dans celui des DOM.

Un modèle conceptuel d'indicateur à partir des représentations collectives du processus de pollution azotée a été construit. Nous avons intégré la dimension climatique à ce modèle par le biais du facteur 'lame d'eau' et tenté d'estimer la quantité d'azote lixivié par parcelle puis par masse d'eau à partir des données d'entrée disponibles et accessibles qui sont les importations d'engrais et les gisements de matière organique par commune.

L'outil construit paraît satisfaisant : compte tenu des difficultés notamment en termes de manque de données disponibles et accessibles, l'échelle de grandeur de nos résultats est valide à l'échelle de la parcelle comme à celle de la masse d'eau. Une des principales limites de l'indicateur repose sur la méconnaissance des apports réels aux cultures et de la difficulté à rendre compte des interconnexions entre masses d'eau. De là, l'outil peut connaître plusieurs évolutions : soit l'on simplifie l'indicateur en supprimant la variable « classe de culture » et en homogénéisant les apports d'azote minéral à la parcelle, soit l'on réalise des enquêtes complémentaires pour élaborer une répartition proche des pratiques de fertilisation réelles. Ce choix sera fait après concertation des acteurs et du commanditaire de l'étude, l'ONEMA. Après quoi, l'outil sera fonctionnel pour le prochain état des lieux en 2019 à La Réunion, aux Antilles et à Mayotte.

# Bibliographie

- ACTeon, Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie, Agences de l'eau. (2015).** *Guide méthodologique pour l'élaboration et la mise en œuvre des Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux*. Paris : MEDDE. 156 p.
- Affeltranger B. (coord.). (2011).** *Guide « pressions-impacts » pour la mise à jour de l'état des lieux DCE*. Paris : Eaufrance. Partie 1 : contexte et enjeux.
- Agence de l'eau Rhône-Méditerranée & Corse. (2011).** *Note du secrétariat technique du SDAGE : Qu'est-ce que le bon état des eaux ?* Lyon : Agence de l'eau Rhône-Méditerranée & Corse. 24 p.
- Balestrat M., Chéry J.-P., Tonneau, J.-P. (2010).** Construction d'indicateurs spatiaux pour l'aide à la décision : intérêt d'une démarche participative. Le cas du périurbain languedocien. In : Coudel E., Devautour H., Soulard C.-T., Hubert B.(eds.) *International symposium ISDA 2010. Innovation and sustainable development in agriculture and food : Abstracts and papers*. International symposium ISDA 2010. Innovation and sustainable development in agriculture and food, 2010/06/28-2010/07/01, Montpellier (France). Montpellier : CIRAD. 13 p.
- Bengouga K. (2010).** *Contribution à l'étude du rôle de la végétation dans l'épuration des eaux usées dans les régions arides*. Master Sciences Agronomiques option agriculture et environnement dans les régions arides : Université Mohamed Khider, Biskra (Algérie).
- Bilot A. (2009).** *Conceptualisation d'un système d'indicateurs : représentation des biens et services écosystémiques affectés par la dégradation des terres*. Master Développement agricole durable : économie internationale et sécurité alimentaire : Université Paris Sud 11. 74 p.
- Bockstaller C., Cariolle M., Marie-Béatrice G., Guichard L., Leclercq C., Morin A., Surleau-Chambenoit C. (2013).** Evaluation agri-environnementale et choix des indicateurs : acquis, enjeux et pistes. *Innovations Agronomiques*, n. 31, p. 1-14.
- Bourdieu P. (2001).** *Science de la Science et Réflexivité. Cours du collège de France 2000-2001*. Paris : Raison d'agir. 240 p. (Cours et Travaux).
- Bourque P.-A. (1997).** *Planète terre. Note de cours en ligne*. Québec : Département de géologie et génie géologique, Université Laval. [Consulté en juillet 2016]. [http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete\\_terre.html](http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html)
- Boussier J. (2015).** *Evaluation des pressions agricoles dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau : contribution au développement d'une méthodologie dans les conditions spécifiques de l'île de la Réunion*. Diplôme d'ingénieur de l'Environnement, Eau, Déchets et Aménagements durables : AgroParisTech. 80 p.
- BRGM. (2012).** *Hydrologie souterraine : ressources souterraines dans les DOM*. Paris : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. 179 p.
- Cabidoche J.-Y., Cattan P., Dorel M., Paillat J.-M. (2002).** *Intensification agricole et risque de pollution azotée des ressources en eau dans les départements français d'outre-mer insulaires : surveiller en priorité les pratiques agricoles dans les périmètres irrigués*. Montpellier : CIRAD. 16 p. Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur une Maîtrise des Impacts Environnementaux de l'Irrigation, 2002/05/28-29, Montpellier (France).
- Canneva G., Guérin-Schneider L. (2011).** La construction des indicateurs de performance des services d'eau en France : mesurer le développement durable ? *Natures Sciences Sociétés*, vol. 19, n. 3, p. 213-223.
- Cattan P. (2015).** *Réflexion sur les indicateurs*. Document non publié, consultable au Cirad.
- Cattan P., Cabidoche Y.-M., Lacas J.-G., Voltz M. (2006).** Effects of tillage and mulching on runoff under banana (*Musa spp.*) on a tropical Andosol. *Soil and Tillage Research*, March, vol. 86, n.1, p. 38-51.

- Chabalier P.-F., Van De Kerchove V., Saint Macary H. (2006).** *Guide de la fertilisation organique à La Réunion*. Montpellier : CIRAD. 302 p.
- Chambre d'Agriculture de La Réunion. (2014).** *Référentiel bovin lait - Ile de La Réunion – Conjoncture 2014*. Saint-Denis: Chambre d'agriculture. 16 p.
- CIRAD, CNRS, INRA, ORSTOM. (1988).** *Les andosols de l'île de la Réunion : préparation d'un programme de recherches pluridisciplinaires*. Paris : CIRAD. 231 p.
- Comité de Bassin de La Réunion. (2010).** *Présentation synthétique relative à la gestion de l'eau à l'échelle du bassin hydrographique*. Saint-Denis : Comité de Bassin Réunion. 27 p.
- Comité de Bassin de La Réunion. (2013).** *État des lieux 2013 du district hydrographique de La Réunion*. Saint-Denis : Comité de Bassin Réunion. 46 p. Partie : Les masses d'eau souterraine, descriptif, inventaire des pressions, évaluation de l'état et du risque de non atteinte des objectifs environnementaux
- DAAF La Réunion. (2012).** *Base d'occupation des sols*, Saint-Denis: DAAF.
- DAAF La Réunion. (2015).** *Base d'occupation des sols*, Saint-Denis: DAAF.
- DAAF La Réunion. (2016).** La culture des légumes : chou, carotte, salade, tomate. *Agreste La Réunion*, Avril 2016, n. 100, 7 p.
- DAF, CIRAD. (2007).** *Atlas des matières organiques issues des activités d'élevage et d'assainissement urbain à La Réunion*. Saint-Denis : DAF Réunion, CIRAD. 70 p.
- Delache X. (2002).** Les indicateurs environnementaux : contexte, pratiques et questions soulevées pour l'évaluation des politiques publiques. *Revue d'économie financière*, n. 66, p. 269-282.
- Dorel M., Achard R., Tixier P. (2008).** SIMBA-N: Modeling nitrogen dynamics in banana populations in wet tropical climate. Application to fertilization management in the Caribbean. *European Journal of Agronomy*, n. 29, p. 38-45.
- Endo A., Mishima S., Kohyama K. (2009).** Modeling nitrate leaching on a cropped Andosol. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, n. 85, p. 41-61.
- Gingras Y. (2008).** Du mauvais usage de faux indicateurs. *Revue d'Histoire moderne et contemporaine*, n. 5, p. 67-79.
- IEDOM. (2015).** *La Réunion - Rapport Annuel 2015. Edition 2016*. Paris : l'Institut d'Émission des Départements d'Outre-mer. 184 p.
- Lange J.-M., Trouvé A., Victor P. (2007).** *Expression d'une opinion raisonnée dans les éducations à... : quels indicateurs*. 11 p. Colloque de l'Actualité de la recherche en éducation et en formation AECSE, 2007/08/31-2007/09/01, Strasbourg (France).
- Le Gall G. (2015).** *Spatialiser des pressions diffuses agricoles (surplus azote) : NOPOLU*. 35 p. 15. Carrefour des Gestions Locales de l'Eau, IDEAL Connaissances, 2014/01/29-30, Rennes (France).
- Mauziri B., Verrel J.-L. (2002).** Des indicateurs pour des actions de maîtrise des pollutions d'origine agricole. *Ingénieries*, n. 30, p. 3-14.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. (2005).** Circulaire DCE N° 2005-12 Du 28/07/05 relative à la définition du « bon état » et à la constitution des référentiels pour les eaux douces de surface (cours d'eau, plans d'eau), en application de la directive européenne 2000/60/DCE du 23 octobre 2000, ainsi qu'à la démarche à adopter pendant la phase transitoire (2005-2007). *Bomedd*, 15 octobre 2005, n. 05/19.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. (2012).** *Mise en oeuvre de la Directive Cadre Sur l'Eau pour un bon état des eaux en 2015*. Paris : Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. 39 p.

- Molénat J., Dorioz J.-M., Gascuel C., Gruau G. (2009).** Les voies de transfert : circulations de l'eau et des polluants dans les bassins versants sur socle. In : Agrotransfert Bretagne. *Territ'eau*. Rennes : Agrotransfert Bretagne. 9 p. [https://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/Territ\\_Eau/CONNAISSANCES/Voies\\_de\\_transfert/chapitre.pdf](https://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/Territ_Eau/CONNAISSANCES/Voies_de_transfert/chapitre.pdf)
- Molénat J., Dorioz J.-M., Gascuel C., Gruau G. (2011).** Les pollutions de l'eau dans les bassins versants agricoles : natures, sources et mécanismes de transfert. In : Agrotransfert Bretagne. *Territ'eau*. Rennes : Agrotransfert Bretagne. 9 p. [https://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/Territ\\_Eau/CONNAISSANCES/Polluants\\_de\\_l\\_eau/chapitre.pdf](https://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/Territ_Eau/CONNAISSANCES/Polluants_de_l_eau/chapitre.pdf)
- Musy A., Higy C., Reynard E. (2014).** *Hydrologie 1 - Une science de la nature, une gestion sociétal*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes. Chapitre 3, le bassin versant et son complexe.
- OCDE. (1993).** *Corps central d'indicateurs de l'OCDE pour les examens des performances*. Paris : OCDE. 41 p. (Monographie sur l'environnement, n. 83).
- Pau Vall M., Vidal C. (1999).** L'azote en agriculture. In : Commission Européenne. *Agriculture, environnement, développement rural : fait et chiffres - les défis de l'agriculture*. [http://ec.europa.eu/agriculture/envir/report/fr/nitro\\_fr/report.htm](http://ec.europa.eu/agriculture/envir/report/fr/nitro_fr/report.htm)
- Plan Bleu, OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel). (1996).** *Les indicateurs d'économie de l'eau : ressources et utilisations*. Hanovre : OSS, CAR-PBIOMED. 64 p.
- Raunet M. (1991).** *Le milieu physique et ses sols de l'île de La Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole*. Montpellier : CIRAD. 515 p.
- Saint Macary H., Medoc J.-M., Chabalier P.-F. (2002).** Systèmes de culture de la Réunion : typologie, spatialisation et éléments pour un référentiel. In : Guerrin F., Paillat J.-M. (eds.). *Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion*. Montpellier : CIRAD. Séminaire de l'ATP 99/60, 2002/06/19-20, Montpellier (France).
- Simon J.-C., Decau M.-L., Vertès F. (1997).** Chargement animal et pollution sous prairie. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, avril, n. 30, p. 29-34.
- Sutton M.A., Howard C.M., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., Van Grinsven H., Grizzetti B. (2011).** *The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives*. Cambridge : Cambridge University Press. 664 p.
- Union Européenne. (2000).** Directive 2000/60/CE Du Parlement Européen et du conseil du 23 Octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Journal Officiel de l'Union Européenne*, 22 décembre 2000, n. L 327, p. 1-73.
- Vayssières J. (2008).** *Modélisation participative et intégration des pratiques décisionnelles d'éleveurs dans un modèle global d'exploitation. Application à l'évaluation de la durabilité des élevages laitiers d'une île tropicale*. Thèse de doctorat en sciences agronomique : Supagro, Montpellier. 179 p.
- Ziberlin O. et al. (2010).** *Guide des bonnes pratiques agricoles à la Réunion*. Saint-Denis : DAAF. 283 p.

# Webographie

- Chambre d'Agriculture de La Réunion. (2016).** *Les Missions de la Chambre d'Agriculture.* <http://www.reunion.chambagri.fr/spip.php?rubrique32>
- Direction de l'Alimentation, de l'Agroalimentaire et de la Forêt de la Réunion. (2016).** *Missions et objectifs.* <http://www.daaf974.agriculture.gouv.fr/>
- Eaufrance. (2016).** *Pressions sur les milieux.* <http://www.eaufrance.fr/observer-et-evaluer/pressions-sur-les-milieux/>
- Météo France. (2015).** *Climat de La Réunion.* <http://www.meteofrance.re/climat/description-du-climat>
- Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. (2015).** *L'agriculture des départements d'outre-mer.* <http://agriculture.gouv.fr/infographie-lagriculture-des-departements-doutre-mer>
- Office de l'eau. (2016).** *Présentation de l'Office de l'Eau Réunion.* <http://www.eaureunion.fr/907/fr/qui-sommes-nous/presentation-de-loffice.html>
- ONEMA. (2012).** *Directive Nitrates.* <http://www.rapportage.eaufrance.fr/directive-nitrates>
- Syndicat du sucre. (2013).** *Rien ne se perd tout se valorise.* <http://www.sucre.re/Rien-ne-se-perd-tout-se-valorise.html>

# Annexes



## Annexe 1 - Tableau comparatif des méthodes d'évaluation existantes

| Méthode                 | Dialecte                                                                             |   |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Facteurs pris en compte | Type de fertilisant                                                                  | X |
|                         | Quantité d'azote apportée / Besoin de la culture                                     | X |
|                         | Rotations                                                                            |   |
|                         | Fractionnement des apports                                                           | X |
|                         | Irrigation                                                                           |   |
|                         | Travail du sol                                                                       |   |
|                         | Taille des parcelles                                                                 | X |
|                         | Présence de CIPAN                                                                    |   |
|                         | Réalisation d'analyses de sol                                                        |   |
|                         | Epandage des effluents                                                               | X |
|                         | Pâturage                                                                             | X |
|                         | Stockage des effluents                                                               | X |
|                         | Devenir des eaux usées (toiture, lavage)                                             | X |
|                         | Type de sol                                                                          |   |
|                         | Minéralisation                                                                       |   |
|                         | Présence de zones tampon                                                             | X |
|                         | Géomorphologie                                                                       |   |
|                         | Proximité des cours d'eau                                                            |   |
|                         | Pluviométrie                                                                         |   |
|                         | Rayonnement                                                                          |   |
| Température             |                                                                                      |   |
| Objectif                | Evaluer la durabilité d'une exploitation agricole                                    |   |
| Principe                | Système de notation des pratiques avec barème                                        |   |
| Echelle                 | Exploitation                                                                         |   |
| Fonction                | Diagnostic d'exploitation                                                            |   |
| Modèle                  |                                                                                      |   |
| Données d'entrée        | Détail de toutes les pratiques au sein de chaque exploitation ou type d'exploitation |   |



| Grille du RAD                                                                                                                                                                                                        | IndiciADES                                                                                                                                    | SOLEO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X                                                                                                                                                                                                                    | X                                                                                                                                             | X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| X                                                                                                                                                                                                                    | X                                                                                                                                             | X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               | X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               | X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| X                                                                                                                                                                                                                    | X                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| X                                                                                                                                                                                                                    | X                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               | X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               | X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Evaluer la durabilité d'une exploitation agricole                                                                                                                                                                    | Evaluer la durabilité d'une exploitation agricole                                                                                             | Suivi de l'évolution des pratiques agricoles dans les aires d'alimentation de captage et d'indicateurs de pression sur la ressource en eau                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Système de notation des pratiques avec barème<br>Un indicateur azoté : la balance azotée                                                                                                                             | Système de notation des pratiques avec barème<br>Un indicateur azoté : la balance azotée                                                      | Liste d'indicateurs simples pour la réalisation d'un suivi des valeurs d'indices dans le temps<br>Pas de prise en compte du milieu<br>Pas de cartographie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Exploitation                                                                                                                                                                                                         | Exploitation                                                                                                                                  | Exploitation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Diagnostic d'exploitation                                                                                                                                                                                            | Diagnostic d'exploitation                                                                                                                     | Diagnostic d'exploitation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Evaluation de 3 aspects : la durabilité économique, la durabilité environnementale et la durabilité sociale<br>Chacun de ces aspects est évalué par 7 critères (indicateurs) notés de 0 à 5 suivant un barème défini | Evaluation des aspects économique, environnementaux et sociaux<br>28 indicateurs répartis en 7 thèmes notés de 0 à 5 suivant un barème défini | Liste d'indicateurs simples                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Balance azotée (apports d'azote, fixation symbiotique, culture et rendements, animaux et alimentation, productions animales et rendements)                                                                           | Bilan CORPEN (apports d'azote, culture et rendements)                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Systèmes de production, assolement et rotation (part de prairie (%), part de la culture principale (%), agriculture biologique / Protection intégrée, surface ou linéaire engagé en MAE (%), surface en sol nu (%), taille moyenne des parcelles, taille de la plus grande parcelle)</li> <li>● Fertilisation et pratiques d'élevage : pression d'azote organique (kg/ha), répartition de la matière organique (%), alance Globale Azotée (kg), utilisation d'outils de raisonnement de la fertilisation</li> <li>● Gestion quantitative de l'eau</li> <li>● Zones non productives : surfaces des structures écologiques (%), linéaire de cours d'eau protégé (%), linéaire de haies entretenues (%), point d'eau et zones humides (%)</li> <li>● Protection des cultures</li> <li>● Matériels et bâtiments</li> <li>● Gestion des sols : non labour</li> </ul> |

| XPERT environnement                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | DAE-G                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | X                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | X                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | X                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | X                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | X                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | X                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | X                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                               |
| Evaluer les impacts des activités sur l'environnement, hiérarchiser les risques environnementaux, proposer des préconisations d'amélioration                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Evaluer les risques d'impacts des pratiques agricoles sur l'environnement, à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation agricole<br>Identifier, comprendre et hiérarchiser les risques d'impacts afin de mettre en place un plan d'actions |
| 3 indicateurs principaux forment l'axe environnemental :<br>Indicateur de sensibilité du milieu (impacts sur l'eau, l'air, l'énergie, la biodiversité et le paysage, le bruit, la santé-sécurité, le sol)<br>Indicateur de pratiques (taux de maîtrise réalisées par rapport aux bornes pratiques présentes dans l'outil)<br>Indicateur d'état (analyse de risques selon l'importance de l'activité et la fréquence de réalisation) | Coupler les indicateurs de pratiques à des indicateurs de sensibilité du milieu<br>Un indicateur est spécifique aux risques de pollution diffuse des ESO par les nitrates                                                                     |
| Exploitation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Parcelle                                                                                                                                                                                                                                      |
| Diagnostic d'exploitation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Hierarchisation des risques / Diagnostic d'exploitation                                                                                                                                                                                       |
| Pas d'accès aux infos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <p>Figure 4 : Agrégation des indicateurs intermédiaires pour évaluer le risque de pollution diffuse des eaux de profondeur par les nitrates</p>                                                                                               |
| Pas d'accès aux infos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Balance azotée<br>Gestion de l'interculture<br>Vulnérabilité des aquifères<br>Potentiel de lessivage des sols                                                                                                                                 |

| Territ'eau                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Merlin                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Evaluer et hiérarchiser les impacts des pratiques agricoles sur la qualité des eaux de surface à l'échelle du bassin versant                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Evaluer qualitativement et hiérarchiser les risques de lessivage de nitrates en fonction de la culture et du milieu, à partir de données simples                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Diagnostic pour évaluer et localiser les risques en fonction :<br>•Sensibilité du milieu (sol et climat)<br>•Pratiques (rotation et excès d'apport)<br>•Zones tampons                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Indicateur composé de 3 sous-indicateurs :<br>•SENSIB (sol)<br>•BDP (climat)<br>•EQUIF (pratiques)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Bassin versant                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Parcelle                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Hierarchisation et spatialisaton des risques                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Hierarchisation et spatialisaton des risques                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <p><b>Sensibilité du milieu</b> : profondeur de sol et lame drainante</p> <p>Estimation du lessivage <b>par type de rotation</b> (dans le cadre d'une fertilisation équilibrée)</p> <p>Estimation du lessivage <b>selon la fertilisation réelle</b></p> <p>x n parcelles</p> <p><b>Dilution</b> par les surfaces hors SAU (bois, fiches, bâti...)</p> <p><b>Abattement</b> lié aux zones humides</p> <p>zoning par sous bassin versant</p> <p><b>Bilan : note nitrate bv</b></p> | <p><b>Adaptation de la Méthode MERLIN</b><br/>Redéfinition des Indicateurs</p> <p><b>Sol</b> → <b>Sensibilité du sol à l'infiltration</b></p> <p><b>BDP</b> → <b>Climat</b> → <b>SENSIB</b></p> <p><b>EQUIF</b> → <b>Fertilisation</b> → <b>Pression polluante dépendant des Pratiques et du Système de culture</b></p> <p><b>PRACSYS</b> → <b>Pression polluante</b></p> <p><b>Interculture</b> → <b>IC</b></p> <p><b>Risque de pollution nitrrique</b> (MERLIN)</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>•Météo : pluviométrie</li> <li>•Sols : profondeurs et carte sols hydromorphes</li> <li>•Pratiques : rotations et apports excessifs d'N (écarts au conseil)</li> <li>•Zones tampons : localisation et surface</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Météo (P et ETP)</li> <li>•Besoin de la culture</li> <li>•Apport d'N</li> <li>•Stock d'N dans le sol</li> <li>•Assolement</li> <li>•Carte des types de sol</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                         |



## Annexe 2 - Compte-rendu première réunion

### Compte-rendu réunion du 09/05/16

Personnes présentes :

|                                                                                                     |                                                                                                       |                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Le Bellec Fabrice (Cirad)<br>Debenay Bruno (DAAF)<br>Cabot Valérie (DAAF)<br>Reilhaes Cécile (DEAL) | Van De Kerchove Virginie<br>(Chambre d'agriculture)<br>Aunay Bertrand (BRGM)<br>Mansuy Alizé (eRcane) | Castanier Christophe (DAAF)<br>De Laburthe Bruno (FRCA)<br>Cimbaro Yohann (ODE)<br>Chopard-Lallier Anaïs (Cirad) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Remarques sur les résultats 2015

L'état des lieux de 2013 a été réalisé sans méthodologie pour les DOM de la part de l'ONEMA. Une méthodologie pour la métropole existe mais elle n'est pas toujours utilisée. Il serait intéressant de consulter ces différentes méthodes pour s'en inspirer.

La question de l'utilisation de produits phytosanitaires par d'autres acteurs que les agriculteurs (communes et particuliers) a été soulevée. Le projet ne se penche cependant que sur la question des pressions agricoles.

Pour certains acteurs, la mise en commun d'indicateurs avec tous les DOM semble compliquée. Ceux-ci verraient plutôt un socle méthodologique commun avec des indicateurs spécifiques à chaque DOM. Nous tenterons cependant, dans la mesure du possible, de partager les mêmes indicateurs pour les DOM où l'accès aux données est comparable (Réunion, Martinique et Guadeloupe / Mayotte et Guyane).

L'état des lieux 2013 a sous-estimé la question des pollutions azotées tandis qu'il a priorisé celles des phytos. Il faudra donc travailler davantage sur les problématiques liées à la fertilisation.

La question de l'importance des pressions agricoles par rapport à l'ensemble des pressions qui pèse sur la ressource a été abordée. Elle pourra faire l'objet d'une discussion avec l'ONEMA pour s'assurer que toutes les pressions seront bien prises en compte lors du prochain état des lieux. Cependant, dans le cadre du projet PRESAGRIDOM, nous nous cantonnerons à l'étude des pressions d'origine agricole puisque c'est ce qui était spécifiquement formulé dans la commande de l'ONEMA au Cirad.

Selon certains acteurs, il est très important de prendre en compte les conditions climatiques et d'application des pesticides ou fertilisants ainsi que les modes de transferts. De même, il faut aller plus loin que la simple estimation des pressions et analyser l'impact réel que ces pressions ont sur la ressource. Une forte pression peut avoir un faible impact et inversement.

Enfin, on insiste sur l'importance de ces indicateurs qui peuvent avoir des répercussions sur les politiques locales.

#### Discussion sur la démarche

La connotation négative d'impacts gêne certains. L'agriculture peut avoir des impacts positifs économiquement ou environnementaux (bilan carbone, rétention d'azote, etc.). La notion de vulnérabilité est à intégrer au schéma ainsi que le contexte pédoclimatique qui joue un rôle en parallèle des pressions. Enfin, le changement climatique peut être considéré comme force motrice selon certains.

Pour valoriser le maximum de connaissances il est important de contacter tous les acteurs. L'approche participative semble impérative.

L'identification des usages phytosanitaires par les agriculteurs ou les particuliers semble possible grâce à la BNV-d. Ce sera plus difficile pour la consommation par les communes. Cependant, avec les politiques de baisse de la consommation en phyto par les collectivités locales, on peut potentiellement considérer cette part de la consommation, in fine, faible. (Cf. Charte régionale pour des communes réunionnaises sans pesticides).

La problématique des apports terrigènes dans les masses d'eau dues à l'érosion est peut-être à prendre en compte. Cela est produit par certaines pratiques agricoles et impacts les lagons et les coraux.

#### Organisation des groupes de travail

Concernant les focus groupe, la majorité des acteurs présents pense que le plus pertinent serait de travailler avec un seul groupe noyaux réunissant des organismes institutionnels et technique. Il sera composé de la DEAL, l'ODE, la chambre d'agriculture, l'ARS, le BRGM, la DAAF, eRCan, Armefflor, FRCA, et du CIRAD. Parfois, plusieurs acteurs font partie d'un même organisme, dans ce cas, les acteurs d'un organisme présents pourront être différents suivant le thème de la réunion. L'interaction et le suivi des travaux d'une réunion à l'autre seront assurés par les acteurs participants à toutes les réunions.

L'AROP-FL, TEREOS, IFREMER, IQUAE, FDGDON et les autres acteurs consultés lors du diagnostic 2015 seront tenus au courant de l'avancé de la démarche. D'autres acteurs pourront être intégrés selon les thématiques des prochaines réunions et selon leur volonté.

## Annexe 3 - Compte rendu de la deuxième réunion

Compte rendu réunion du 06/06/2016

|                          |                                             |                                  |
|--------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|
| Aunay Bertrand (BRGM)    | Valérie Cabot (DAAF)                        | Paillat Jean (eRcane)            |
| Reilhes Cécile (DEAL)    | Yohann Cimbaro (ODE)                        | Le Bellec Fabrice (Cirad)        |
| Bruno De Laburthe (FRCA) | Virgine Van de Kerchove<br>(Chambre d'agri) | Chopard-Lallier Anaïs<br>(Cirad) |

### Les objectifs globaux

Les objectifs environnementaux de gestion des pollutions d'origine agricole identifiés via la bibliographie ont été présentés. Il s'agit des suivants :

- Assurer le fonctionnement durable des écosystèmes
- Assurer un bon état des eaux / la qualité des eaux potables (santé publique)
- Lutter contre les pollutions ponctuelles et diffuses / diminuer les rejets dangereux
- Améliorer les connaissances sur les zones à risques
- Cibler les actions

Globalement, les acteurs présents sont en accord avec ces objectifs. Ceux-ci ont soulevés quelques remarques :

A propos de l'amélioration des connaissances sur les zones à risque, il est important de prendre en compte les phénomènes de transferts dans cet objectif. Certaines eaux peuvent avoir une dizaine d'années et les conséquences des pratiques, qu'elles soient bonnes ou mauvaises, peuvent ne pas être mesurables tout de suite. Il existe des méthodes de datation des eaux mais les connaissances sur ces phénomènes restent à améliorer.

Le suivi des masses d'eau permet de localiser certaines zones à risques. Cependant, il est possible que des zones à risque ne soient pas identifiées parce qu'elles ne font pas partie du réseau de suivi.

Bien que le BRGM travaille sur la question de la distinction entre nitrates d'origine assainissement collectif et agricole, l'origine des pollutions n'est pas bien définie.

A La Réunion, la problématique des pollutions azotées n'a pas encore atteint les seuils d'eaux dites polluées mais la tendance est à la hausse pour certaines masses d'eau souterraines. Il faut donc agir avant le dépassement de ces seuils. Et, bien que la part d'azote d'origine agricole dans la pollution totale des eaux ne soit pas connue, il est indéniable que le secteur agricole est une source d'apports d'azote dans l'eau. Ce secteur, comme les autres secteurs sources, doit donc mettre en place des actions pour remédier à la hausse des pollutions azotées.

### Les facteurs influençant le passage de la pression à la pollution azotée

Selon les dires des acteurs, il est important d'ajouter à la représentation du processus de pollution

- les transferts entre masses d'eau, notamment des eaux de surfaces aux eaux souterraines, puisqu'ils influencent directement les transferts d'azote,
- le travail du sol qui peut influencer sur l'infiltration et la minéralisation,
- l'irrigation qui a l'avantage, par rapport à la pluie, d'être contrôlée et de permettre ainsi la pénétration de la matière organique dans le sol
- les rejets gazeux puisqu'ils diminuent la part d'azote lixiviée

Cette représentation ne prend compte que la pression azotée mais cette pression n'est pas la seule causée par la fertilisation. Selon certains acteurs, on devrait tenter d'évaluer aussi la pression phosphorée puisque celle-ci est source de problèmes d'eutrophisation. Bien que nous manquions de connaissances sur le phosphore, des travaux sur le sujet sont en cours. Il faut voir si les données disponibles permettent d'évaluer ou non cette pression ou s'il faut préconiser la collecte de nouvelles données pour être en capacité de le faire dans le futur.

On note aussi que les zones tampons seraient intéressantes à prendre en compte. Si, selon certains, elles sont très présentes sur l'île, tous s'accordent à dire que les surfaces varient fortement suivant les secteurs.

### Les indicateurs à associer aux facteurs

Ce schéma associant facteurs-indicateurs a été complété avec les nouveaux facteurs tout comme le schéma précédent.

Selon certains acteurs, l'idée de vulnérabilité des eaux souterraines n'apparaît pas dans les indicateurs. Il faut donc compléter le schéma avec la pente, la perméabilité du sol, l'épaisseur des zones non saturées, la présence de nappes captives ou non-captives.

La culture de canne étant dominante sur l'île, la question de l'importance de la prise en compte des sols nus a été soulevée. Cependant, certains ont constaté qu'il pouvait y avoir un risque après la coupe ou lors de la plantation de cette culture.

#### Discussion sur les méthodes d'évaluation de la pression azotée

Globalement, il a été noté par les acteurs qu'un inventaire des données manquantes pour construire un indicateur plus précis dans le futur serait pertinent.

#### **Méthode Merlin :**

Les acteurs ont remarqué que le fait que cet indicateur ait déjà été adapté à La Réunion est intéressant et que c'est la seule méthode à prendre en compte la vulnérabilité du milieu.

Concernant le sous-indicateur EQUIF, les remarques suivantes ont été formulées par les acteurs :

- le coefficient apparent d'utilisation de l'azote fixé à 80 % ne semble pas adapté. Le chiffre est à revoir,
- le stock d'azote du sol ne paraît pas possible à estimer,
- les apports d'azote (doses et nombre d'apports) réalisés actuellement par les agriculteurs ne sont pas connus précisément. Aujourd'hui, des données moyennes par filière sont disponibles pour le maraîchage mais pas pour la canne,
- pour l'épandage de matières organiques, on a seulement une carte des sols potentiellement épandables,
- il faudra prendre en compte la matière organique d'origine non-agricole,
- une autre solution pourrait être de partir du cheptel total de chaque bassin versant pour estimer la quantité d'effluents. On y ajoute la matière organique d'origine non-agricole et on divise le tout sur la surface épandable du bassin. Pour l'azote minéral, on prend les chiffres de la douane sur l'importation d'engrais minéraux qu'on divise sur la SAU totale de l'île.

Les remarques qui ont été évoquées concernant le sous-indicateur SENSIB sont les suivantes :

- Ce sous-indicateur ne prend pas en compte la pollution par ruissellement. On pourrait, par exemple, l'estimer à partir d'une carte des pentes,
- La carte des sols de La Réunion n'est pas actualisée et a été remise en question par Frédéric FEDER. Il faut donc voir avec lui quels sont ses défauts et si elle peut tout de même être exploitée. A défaut, une carte de l'IDPR (vulnérabilité des eaux souterraines), moins précise, a été réalisée par le BRGM,
- L'indicateur SENSIB classe les types de sol associés à une pente moyenne et à une perméabilité moyenne, à dire d'experts du plus vulnérable au moins vulnérable. Il faudrait séparer les caractères pente et perméabilité du type de sol. Cela complexifierait l'indicateur et le rendrait plus précis.

#### **Méthodes d'évaluation des exploitations :**

Selon les personnes présentes, ces méthodes semblent peu adaptées.

#### **Modélisation :**

Au vu du temps imparti avant le prochain état des lieux (2019) et des données manquantes, cela semble impossible à développer selon les acteurs.

#### **Territ' eau :**

Selon certains, cette méthode ne prend pas vraiment en compte la vulnérabilité du milieu.

## Annexe 4 - Synthèse des réponses au sondage

| Noms, prénoms et organismes des répondants                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |      |      |                          |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|--------------------------|------|
| Jean Paillat                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | eRcane                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |      |      |      |                          |      |
| Pierre Todoroff                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Cirad                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |      |      |      |                          |      |
| Philippe Rondeau                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Tereos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |      |      |      |                          |      |
| Frédéric Feder                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Cirad                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |      |      |      |                          |      |
| Bertrand Aunay                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | BRGM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |      |      |      |                          |      |
| Bruno De Laburthe                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | FRCA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |      |      |      |                          |      |
| Didier Vincenot                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | CA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |      |      |      |                          |      |
| Arthur Hebreteau                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | PNR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |      |      |      |                          |      |
| Virginie Van de Kerchove                                                                                                                                                                                                                                                                                              | CA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |      |      |      |                          |      |
| Hiérarchisation des facteurs intervenant dans le processus de pollution azotée dans le contexte spécifique de La Réunion                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |      |      |                          |      |
| Estimez l'importance de chaque facteur dans le processus de pollution azotée dans le contexte spécifique de La Réunion                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |      |      |                          |      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Pourcentage des réponses obtenues par note                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |      |      |                          |      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2    | 3    | 4    | 5                        |      |
| Quantité d'azote apportée                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 22,2 | 11,1 | 33,3 | 33,3                     |      |
| Besoin de la culture                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0    | 33,3 | 44,4 | 22,2                     |      |
| Type de fertilisant utilisé                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 11,1 | 55,6 | 22,2 | 11,1                     |      |
| Fractionnement des apports azotés                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 11,1 | 44,4 | 33,3 | 11,1                     |      |
| Irrigation                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 11,1 | 77,8 | 11,1 | 0                        |      |
| Travail du sol                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 22,2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 33,3 | 33,3 | 11,1 | 0                        |      |
| Pluviométrie                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0    | 55,6 | 33,3 | 11,1                     |      |
| Présence de zone tampon                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 33,3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 33,3 | 22,2 | 0    | 11,1                     |      |
| Type de sol                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 22,2 | 44,4 | 11,1 | 22,2                     |      |
| Remarques                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | L'échelle de 1 à 5 est à mon avis peu adapté. Le type de sol peut faire                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |      |      |                          |      |
| Partage des eaux infiltration/ruissellement                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |      |      |                          |      |
| Sélectionnez l'hypothèse qui vous paraît la plus pertinente pour la construction de l'indicateur                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |      |      |                          |      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |      |      | Pourcentage des réponses |      |
| Les sols réunionnais sont très majoritairement des andosols et des sols bruns ayant des propriétés d'infiltration relativement similaires. Le partage des eaux dépend surtout de l'état de surface du sol autrement dit, de la couverture du sol et du travail du sol, et donc de la culture en place sur la parcelle |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |      |      | 22,2                     |      |
| Le partage des eaux dépend surtout du type de sol. La couverture du sol l'influence peu                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |      |      | 11,1                     |      |
| Le partage des eaux dépend du type de sol autant que de la couverture du sol.                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |      |      | 33,3                     |      |
| Je ne sais pas                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |      |      | 0                        |      |
| Autre                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |      |      | 33,3                     |      |
| Quel est selon vous l'importance du ruissellement dans le processus de pollution azotée ?                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |      |      |                          |      |
| Note                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1    | 2    | 3    | 4                        | 5    |
| Pourcentage de réponses                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 22,2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 11,1 | 0    | 33,3 | 22,2                     | 11,1 |
| Remarques                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Les travaux anciens et récents ont montré que le ruissellement était quantitativement faible en présence d'une culture installée. Le risque est surtout lorsque les sols sont très en pente, viennent d'être labourés et qu'une forte pluie intervient ; la somme de toutes ces conditions sont sombres rares. De plus, les nitrates sont très vite incorporés dans les premiers centimètres voire dizaines de centimètres du sol et ne sont donc pas transportés par ruissellement ou érosion. |      |      |      |                          |      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | L'infiltration est aussi un processus très important.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |      |      |      |                          |      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Difficile à dire car ruissellement vers ravines = évacuation vers la mer.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |      |      |      |                          |      |

| Répartition des engrais                                                                                                                                                                        |                      |  |  |  |  |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--|--|--|--|--|--|
| <b>Comment estimez-vous la répartition des épandages de la matière organique d'origine agricole produite à La Réunion par catégorie de cultures (en pourcentage des surfaces épandables) ?</b> |                      |  |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                | Moyenne des réponses |  |  |  |  |  |  |
| Canne                                                                                                                                                                                          | 0,44                 |  |  |  |  |  |  |
| Prairie                                                                                                                                                                                        | 0,386                |  |  |  |  |  |  |
| Maraîchage                                                                                                                                                                                     | 0,134                |  |  |  |  |  |  |
| Verger                                                                                                                                                                                         | 0,04                 |  |  |  |  |  |  |
| <b>Comment estimez-vous la répartition des apports d'engrais importés à La Réunion par catégorie de cultures (en pourcentage de la SAU totale toutes cultures confondues) ?</b>                |                      |  |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                | Moyenne des réponses |  |  |  |  |  |  |
| Canne                                                                                                                                                                                          | 0,689                |  |  |  |  |  |  |
| Prairie                                                                                                                                                                                        | 0,102                |  |  |  |  |  |  |
| Maraîchage                                                                                                                                                                                     | 0,161                |  |  |  |  |  |  |
| Verger                                                                                                                                                                                         | 0,048                |  |  |  |  |  |  |



## Annexe 6 - Calcul des entrées d'azote par parcelle

| Répartition de l'azote minéral               |                       |             |                                             |              |                       |  |
|----------------------------------------------|-----------------------|-------------|---------------------------------------------|--------------|-----------------------|--|
| Kg d'azote importé                           |                       | SAU         |                                             |              |                       |  |
|                                              | 2015                  | SAU totale  | 42081                                       |              |                       |  |
| Total kg azote                               | 5 812 335             | SAU canne   | 24737                                       |              |                       |  |
| Source : Douanes                             |                       | SAU Prairie | 4132                                        |              |                       |  |
|                                              |                       | SAU Maraich | 10897                                       |              |                       |  |
|                                              |                       | SAU Verger  | 2309                                        |              |                       |  |
| Source : BOS, DAAF                           |                       |             |                                             |              |                       |  |
| Répartition A                                |                       |             | Répartition B                               |              |                       |  |
|                                              | taux de répartition A |             |                                             | Besoin*SAU   | Taux de répartition B |  |
| Canne                                        | 0,6890                |             | Canne                                       | 2 374 709,17 | 0,44                  |  |
| Prairie                                      | 0,1020                |             | Prairie                                     | 619 742,63   | 0,11                  |  |
| Maraichage                                   | 0,1610                |             | Maraichage                                  | 2 134 833,59 | 0,39                  |  |
| Verger                                       | 0,0480                |             | Verger                                      | 304 412,12   | 0,06                  |  |
| Source : sondage                             |                       |             |                                             |              |                       |  |
| Répartition (A) N minéral total sur cultures |                       |             | Répartition (B) N minéral total sur culture |              |                       |  |
|                                              | kg N                  |             |                                             | kg N         |                       |  |
| Canne                                        | 4006287               |             | Canne                                       | 2540186      |                       |  |
| Prairie                                      | 593132                |             | Prairie                                     | 662928       |                       |  |
| Maraichage                                   | 934010                |             | Maraichage                                  | 2283596      |                       |  |
| Verger                                       | 278906                |             | Verger                                      | 325625       |                       |  |
|                                              | kg N / ha             |             |                                             | kg N / ha    |                       |  |
| Canne                                        | 162                   |             | Canne                                       | 103          |                       |  |
| Prairie                                      | 144                   |             | Prairie                                     | 160          |                       |  |
| Maraichage                                   | 86                    |             | Maraichage                                  | 210          |                       |  |
| Verger                                       | 121                   |             | Verger                                      | 141          |                       |  |

| Répartition de l'azote organique |                 |                |                          |                                 |                    |                 |                          |                  |                 |                  |                          |                   |              |
|----------------------------------|-----------------|----------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------------|------------------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------------|--------------|
| Gisement (tonnes)                | Lisier de bovin | Lisier de porc | Lisier de poule pondeuse | Fiente séchée de poule pondeuse | Fumier de volaille | Fumier de bovin | Fumier de caprin (cabri) | Fumier de cheval | Fumier de lapin | Fumier de mouton | Compost de déchets verts | Ecume de sucrerie | kg d'N total |
| LES AVIRONS                      | 5700            | 10000          | 310                      | 34                              | 250                | 160             | 690                      | 140              | 690             | 0                |                          |                   | 6956         |
| BRAS-PANON                       | 1800            | 1100           | 1400                     | 160                             | 630                | 51              | 150                      | 0                | 280             | 0                |                          |                   | 2536         |
| ENTRE-DEUX                       | 3200            | 1100           | 2100                     | 230                             | 310                | 89              | 210                      | 0                | 280             | 0                |                          |                   | 3400         |
| L'ÉTANG-SALE                     | 4600            | 3300           | 53                       | 6                               | 120                | 130             | 690                      | 150              | 460             | 1                |                          |                   | 3546         |
| PETITE-ÎLE                       | 6200            | 5700           | 0                        | 0                               | 230                | 170             | 670                      | 120              | 41              | 71               |                          |                   | 5096         |
| LA PLAINE-DES-PALMISTES          | 19000           | 1000           | 660                      | 74                              | 220                | 520             | 150                      | 83               | 1400            | 25               |                          |                   | 8973         |
| LE PORT                          | 68              | 0              | 0                        | 0                               | 67                 | 0               | 0                        | 0                | 0               | 0                | 3800                     |                   | 444          |
| LA POSSESSION                    | 4500            | 940            | 62                       | 7                               | 910                | 130             | 560                      | 41               | 160             | 6                |                          |                   | 2892         |
| SAINT-ANDRE                      | 2400            | 5100           | 1900                     | 220                             | 1100               | 67              | 630                      | 360              | 2200            | 0                |                          | 32000             | 8736         |
| SAINT-BENOIT                     | 8700            | 12000          | 0                        | 0                               | 620                | 240             | 1200                     | 330              | 3400            | 9                |                          |                   | 9655         |
| SAINT-DENIS                      | 8100            | 3500           | 54                       | 6                               | 230                | 230             | 1100                     | 200              | 89              | 0                |                          |                   | 5121         |
| SAINT-JOSEPH                     | 46000           | 35000          | 660                      | 74                              | 550                | 1300            | 1000                     | 83               | 670             | 65               |                          |                   | 33704        |
| SAINT-LEU                        | 36000           | 5200           | 13                       | 1                               | 160                | 1000            | 1900                     | 270              | 930             | 16               |                          |                   | 17358        |
| SAINT-LOUIS                      | 18000           | 13000          | 280                      | 32                              | 210                | 500             | 940                      | 74               | 250             | 1                |                          | 47000             | 17733        |
| SAINT-PAUL                       | 56000           | 20000          | 1800                     | 200                             | 1400               | 1600            | 3800                     | 710              | 190             | 81               |                          |                   | 33588        |
| SAINT-PIERRE                     | 22000           | 23000          | 6                        | 1                               | 190                | 620             | 3000                     | 240              | 900             | 46               | 2560                     |                   | 19302        |
| SAINT-PHILIPPE                   | 260             | 910            | 0                        | 0                               | 8                  | 7               | 15                       | 0                | 8               | 0                |                          |                   | 478          |
| SAINTE-MARIE                     | 7800            | 460            | 0                        | 0                               | 320                | 220             | 440                      | 690              | 61              | 40               |                          |                   | 3780         |
| SAINTE-ROSE                      | 140             | 1100           | 0                        | 0                               | 700                | 3               | 95                       | 17               | 150             | 0                | 300                      |                   | 964          |
| SAINTE-SUZANNE                   | 4200            | 1700           | 3                        | 0                               | 190                | 120             | 450                      | 91               | 560             | 0                |                          |                   | 2707         |
| SALAZIE                          | 8400            | 24000          | 3200                     | 350                             | 1200               | 240             | 260                      | 0                | 630             | 41               |                          |                   | 15972        |
| LE TAMPON                        | 190000          | 8100           | 3900                     | 430                             | 1100               | 5200            | 1900                     |                  | 520             | 470              | 1200                     |                   | 83921        |
| LES TROIS-BASSINS                | 27000           | 7900           | 0                        | 0                               | 170                | 750             | 390                      | 33               | 61              | 0                |                          |                   | 14264        |
| CILAOS                           | 5400            | 0              | 0                        | 0                               | 16                 | 150             | 61                       | 0                | 5               | 0                |                          |                   | 2205         |

Chopard-Lallier A. Proposition d'un indicateur pour évaluer la pression azotée d'origine agricole impactant la qualité des eaux de surface à l'échelle de la masse d'eau, adapté au contexte spécifique réunionnais

|                                                         | Taux de répartition N organique | SAU/commune (ha)        | Canne   | Prairie    | Maraichage | Verger | SAU totale |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------|------------|------------|--------|------------|
| Canne                                                   | 0,44                            | LES AVIRONS             | 118     | 80         | 67         | 26     | 291        |
| Prairie                                                 | 0,386                           | BRAS-PANON              | 1019    | 40         | 19         | 22     | 1100       |
| Maraichage                                              | 0,134                           | ENTRE-DEUX              | 48      | 27         | 87         | 29     | 191        |
| Verger                                                  | 0,04                            | L'ÉTANG-SALE            | 285     | 65         | 106        | 86     | 542        |
| Source : sondage                                        |                                 | PETITE-ÎLE              | 1107    | 84         | 201        | 98     | 1490       |
|                                                         |                                 | LA PLAINE-DES-PALMISTES | 0       | 617        | 24         | 10     | 651        |
| <b>Equivalents engrais</b>                              |                                 | LE PORT                 | 0       | 3          | 21         | 18     | 42         |
|                                                         | EC-N                            | LA POSSESSION           | 60      | 53         | 42         | 12     | 168        |
| Lisier de bovin                                         | 0,400                           | SAINT-ANDRE             | 1874    | 59         | 103        | 49     | 2085       |
| Lisier de porc                                          | 0,400                           | SAINT-BENOIT            | 3330    | 226        | 197        | 463    | 4217       |
| Lisier de poule pondeuse                                | 0,600                           | SAINT-DENIS             | 78      | 28         | 127        | 17     | 250        |
| Fiente séchée de poule pondeuse                         | 0,600                           | SAINT-JOSEPH            | 1719    | 496        | 409        | 168    | 2793       |
| Fumier de volaille                                      | 0,550                           | SAINT-LEU               | 1358    | 1535       | 200        | 44     | 3137       |
| Fumier de bovin                                         | 0,150                           | SAINT-LOUIS             | 1332    | 193        | 184        | 93     | 1804       |
| Fumier de caprin (cabri)                                | 0,200                           | SAINT-PAUL              | 1890    | 1309       | 482        | 263    | 3944       |
| Fumier de cheval                                        | 0,230                           | SAINT-PIERRE            | 2945    | 331        | 331        | 243    | 3852       |
| Fumier de lapin                                         | 0,200                           | SAINT-PHILIPPE          | 889     | 12         | 88         | 202    | 1191       |
| Fumier de mouton                                        | 0,200                           | SAINTE-MARIE            | 1563    | 296        | 79         | 36     | 1975       |
| Compost de déchets verts                                | 0,100                           | SAINTE-ROSE             | 1642    | 0          | 99         | 181    | 1922       |
| Ecume de sucrerie                                       | 0,100                           | SAINTE-SUZANNE          | 2060    | 147        | 145        | 72     | 2424       |
| Source : MVAD                                           |                                 | SALAZIE                 | 46      | 17         | 211        | 50     | 324        |
|                                                         |                                 | LE TAMPON               | 858     | 4431       | 732        | 75     | 6096       |
|                                                         |                                 | LES TROIS-BASSINS       | 167     | 720        | 24         | 1      | 912        |
|                                                         |                                 | CILAOS                  | 0       | 5          | 93         | 10     | 107        |
|                                                         |                                 | Source : BOS DAAF       |         |            |            |        |            |
| <b>Répartition MO totale par culture et par commune</b> |                                 | Canne                   | Prairie | Maraichage | Verger     |        |            |
| LES AVIRONS                                             |                                 | 3061                    | 2685    | 932        | 278        |        |            |
| BRAS-PANON                                              |                                 | 1116                    | 979     | 340        | 101        |        |            |
| ENTRE-DEUX                                              |                                 | 1496                    | 1312    | 456        | 136        |        |            |
| L'ÉTANG-SALE                                            |                                 | 1560                    | 1369    | 475        | 142        |        |            |
| PETITE-ÎLE                                              |                                 | 2242                    | 1967    | 683        | 204        |        |            |
| LA PLAINE-DES-PALMISTES                                 |                                 | 0                       | 6185    | 2147       | 641        |        |            |
| LE PORT                                                 |                                 | 0                       | 306     | 106        | 32         |        |            |
| LA POSSESSION                                           |                                 | 1272                    | 1116    | 388        | 116        |        |            |
| SAINT-ANDRE                                             |                                 | 3844                    | 3372    | 1171       | 349        |        |            |
| SAINT-BENOIT                                            |                                 | 4248                    | 3727    | 1294       | 386        |        |            |
| SAINT-DENIS                                             |                                 | 2253                    | 1977    | 686        | 205        |        |            |
| SAINT-JOSEPH                                            |                                 | 14830                   | 13010   | 4516       | 1348       |        |            |
| SAINT-LEU                                               |                                 | 7637                    | 6700    | 2326       | 694        |        |            |
| SAINT-LOUIS                                             |                                 | 7802                    | 6845    | 2376       | 709        |        |            |
| SAINT-PAUL                                              |                                 | 14779                   | 12965   | 4501       | 1344       |        |            |
| SAINT-PIERRE                                            |                                 | 8493                    | 7451    | 2586       | 772        |        |            |
| SAINT-PHILIPPE                                          |                                 | 210                     | 185     | 64         | 19         |        |            |
| SAINTE-MARIE                                            |                                 | 1663                    | 1459    | 507        | 151        |        |            |
| SAINTE-ROSE                                             |                                 | 691                     | 0       | 210        | 63         |        |            |
| SAINTE-SUZANNE                                          |                                 | 1191                    | 1045    | 363        | 108        |        |            |
| SALAZIE                                                 |                                 | 7028                    | 6165    | 2140       | 639        |        |            |
| LE TAMPON                                               |                                 | 36925                   | 32394   | 11245      | 3357       |        |            |
| LES TROIS-BASSINS                                       |                                 | 6276                    | 5506    | 1911       | 571        |        |            |
| CILAOS                                                  |                                 | 0                       | 1520    | 528        | 157        |        |            |

| Répartition MO/ha       | Canne | Prairie | Maraichage | Verger | Ensemble des cultures |
|-------------------------|-------|---------|------------|--------|-----------------------|
| LES AVIRONS             | 26    | 34      | 14         | 11     | 23,9                  |
| BRAS-PANON              | 1     | 25      | 18         | 5      | 2,3                   |
| ENTRE-DEUX              | 31    | 48      | 5          | 5      | 17,8                  |
| L'ÉTANG-SALE            | 5     | 21      | 4          | 2      | 6,5                   |
| PETITE-ÎLE              | 2     | 23      | 3          | 2      | 3,4                   |
| LA PLAINE-DES-PALMISTES | 0     | 10      | 90         | 62     | 13,8                  |
| LE PORT                 | 0     | 98      | 5          | 2      | 10,5                  |
| LA POSSESSION           | 21    | 21      | 9          | 9      | 17,3                  |
| SAINT-ANDRE             | 2     | 57      | 11         | 7      | 4,2                   |
| SAINT-BENOIT            | 1     | 16      | 7          | 1      | 2,3                   |
| SAINT-DENIS             | 29    | 72      | 5          | 12     | 20,5                  |
| SAINT-JOSEPH            | 9     | 26      | 11         | 8      | 12,1                  |
| SAINT-LEU               | 6     | 4       | 12         | 16     | 5,5                   |
| SAINT-LOUIS             | 6     | 35      | 13         | 8      | 9,8                   |
| SAINT-PAUL              | 8     | 10      | 9          | 5      | 8,5                   |
| SAINT-PIERRE            | 3     | 22      | 8          | 3      | 5,0                   |
| SAINT-PHILIPPE          | 0     | 16      | 1          | 0      | 0,4                   |
| SAINTE-MARIE            | 1     | 5       | 6          | 4      | 1,9                   |
| SAINTE-ROSE             | 0,4   | 0       | 2          | 0,3    | 0,5                   |
| SAINTE-SUZANNE          | 1     | 7       | 2          | 2      | 1,1                   |
| SALAZIE                 | 154   | 359     | 10         | 13     | 49,3                  |
| LE TAMPON               | 43    | 7       | 15         | 45     | 13,8                  |
| LES TROIS-BASSINS       | 38    | 8       | 80         | 602    | 15,6                  |
| CILAOS                  | 0     | 307     | 6          | 17     | 20,6                  |

## Annexe 7 - Calcul mm irrigués

| Calcul mm irrigués par périmètre d'irrigation |              |                     |          |        |
|-----------------------------------------------|--------------|---------------------|----------|--------|
| Périmètre d'irrigation                        | Surface (ha) | Prélèvement (m3/an) | m3/an/ha | mm/an  |
| Bras de Cilaos                                | 3560,1       | 15 000 000,00       | 4 213,36 | 421,34 |
| Bras de la Plaine                             | 6234,2       | 37 500 000,00       | 6 015,21 | 601,52 |
| Champ Borne                                   | 2003,5       | 500 000,00          | 249,56   | 24,96  |
| ILO                                           | 4653,3       | 9 400 000,00        | 2 020,07 | 202,01 |

## **Le mémoire de *Master* du CIHEAM**

L'année de Master 2 est composée de deux séquences. La première est constituée de modules d'enseignement théorique et méthodologique, d'applications techniques, et de travaux individuels ou de groupes. La deuxième séquence est consacrée à un stage professionnel ou de recherche, à la rédaction et la soutenance d'un mémoire.

L'objectif du stage est de permettre à l'étudiant d'appliquer les outils théoriques et méthodologiques acquis pour analyser un sujet ou répondre à un questionnement dans un contexte précis. Le mémoire présente et discute les résultats obtenus ainsi que le cadre théorique et la méthodologie utilisée.

La collection *Master* du CIHEAM publie et valorise les meilleurs mémoires des étudiants de Montpellier ayant obtenu la « mention publication » lors de la soutenance. L'objectif de cette collection est de donner l'occasion aux étudiants du pourtour méditerranéen de réaliser une première publication et de faire connaître leurs travaux de recherche.

### ***CIHEAM's Master dissertation***

*Master 2 training consists of two sequences. The first comprises theoretical and methodological units, technical applications, and individual or group work. The second is devoted to a professional or research internship and to the writing and defence of a dissertation.*

*The internship aims to provide students with the opportunity to apply the acquired theoretical and methodological tools in order to analyze a topic or answer questions in a specific context. The dissertation is a presentation and discussion of the results obtained, and the theoretical framework and methodology used.*

*The collection Master of CIHEAM publishes and promotes the best dissertations of students of Montpellier who were awarded the "publishable work" distinction during the defence. The objective of this collection is to provide opportunities for students around the Mediterranean to achieve a first release and publicize their research.*

# CIHEAM

**Centre International de Hautes Etudes  
Agronomiques Méditerranéennes**

***International Centre for Advanced  
Mediterranean Agronomic Studies***

**Secrétariat Général / *General Secretary***

11, rue Newton  
75116 PARIS  
Tel. : (33) (0)1 53 23 91 00 – Fax : (33) (0)1 53 23 91 01  
Web : [www.ciheam.org](http://www.ciheam.org)



**Instituts Agronomiques Méditerranéens  
*Mediterranean Agronomic Institutes*  
(IAM)**

---

**Bari - Chania - Montpellier – Zaragoza**

---

**IAM - Bari**

Via Ceglie 9  
70010 Valenzano, Bari, Italy  
Tel. : (39) 080 4606111 – Fax : (39) 080 4606206  
Web : [www.iamb.ciheam.org](http://www.iamb.ciheam.org)

**IAM - Chania**

Alsyllo Agrokepjo, 1 Makedonias str  
73100 Chania, Crete, Greece  
Tel. : (30) 28210 35000 – Fax : (30) 28210 35001  
Web : [www.maic.ciheam.org](http://www.maic.ciheam.org)

**IAM - Montpellier**

3191, Route de Mende  
34093 Montpellier Cedex 5, France  
Tel. : (33) (0)4 67 04 60 00 – Fax : (33) (0)4 67 54 25 27  
Web : [www.iamm.ciheam.org](http://www.iamm.ciheam.org)

**IAM - Zaragoza**

Av. Montañana 1005  
50059 Zaragoza, Spain  
Tel. : (34) 976 71 6000 – Fax : (34) 976 71 6001  
Web : [www.iamz.ciheam.org](http://www.iamz.ciheam.org)

**Chopard-Lallier A. (2017).** *Proposition d'un indicateur pour évaluer la pression azotée d'origine agricole impactant la qualité des eaux de surface à l'échelle de la masse d'eau, adapté au contexte spécifique réunionnais.* Montpellier (France) : CIHEAM-IAMM. 91 p. (Master, n. 155).

## Résumé

La Directive Cadre sur l'eau est une directive européenne visant à l'atteinte du bon état de l'ensemble des masses d'eau européennes. Elle exige qu'un état des lieux de ces masses d'eau soit réalisé tous les 6 ans. Celui-ci se compose d'un volet évaluation des pressions agricoles et, notamment, de la pression azotée. Des méthodes d'évaluation pour mesurer cette pression ont été développées en France métropolitaine ; malheureusement, celles-ci ne prennent pas en compte les conditions spécifiques des Départements d'Outre-Mer. C'est en ce sens que notre travail tente de construire un indicateur de la pression azotée d'origine agricole impactant la qualité des eaux de surface, à l'échelle de la masse d'eau, dans le contexte réunionnais et plus largement dans celui des DOM. La démarche mise en place se veut participative : à partir de rencontres avec les acteurs locaux, nous avons élaboré une représentation partagée du processus de pollution azotée. Un modèle conceptuel d'indicateur a été construit et testé selon deux hypothèses concernant les pratiques de fertilisation. La première hypothèse a été formulée selon les dires d'acteurs, la deuxième de façon théorique. Les résultats de ces tests diffèrent en fonction de l'hypothèse utilisée à l'échelle de la parcelle, mais semblent converger après agrégation à l'échelle de la masse d'eau. Aucune des deux hypothèses ne paraissant cependant concorder avec la réalité, l'indicateur devra être simplifié, à moins que des enquêtes complémentaires sur les pratiques réelles de fertilisation soient réalisées pour pallier au manque de données à ce sujet. Après quoi, cet outil pourra être utilisé lors du prochain état des lieux à La Réunion et, sous quelques conditions, aux Antilles et à Mayotte.

## Abstract

*The Water Framework Directive is an EU directive aimed at achieving a good status for all European bodies of water. It stipulates that an inventory of these water bodies must be conducted every 6 years. This involves an evaluation of agricultural pressures, and in particular nitrogen pressure. Assessment methods to measure this pressure have been developed in mainland France; unfortunately, they do not take the specific conditions of the French overseas departments into account. That is why our work endeavors to construct an indicator of agricultural nitrogen pressure impacting surface water quality on the scale of a body of water in the context of Réunion Island and, more broadly speaking, in overseas departments. The approach implemented is participatory: from meetings with local stakeholders, we developed a shared representation of the local nitrogen pollution process. A conceptual model was built and tested according to two hypotheses relating to the fertilization practices. The first was formulated based on stakeholders' accounts while the second was theoretical. The results of these tests differ according to the hypothesis used on the plot scale, but seem to converge after aggregation on the scale of the body of water. Neither hypothesis seems to be consistent with reality, and the indicator should be simplified unless further investigations are conducted on actual fertilization practices to overcome the lack of data on this subject. This tool could subsequently be used during the next inventory on Réunion Island and, conditionally, in the Caribbean and Mayotte.*